INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
NUEVA VISIÓN DE LA VÍA LÁCTEA | EL PRECIO DE CONTAMINAR | REDES TRÓFICAS DE LA ANTÁRTIDA
AGOSTO 2020 N.º 527

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Agosto 2020 • N.º 527 • 6,90 € • investigacionyciencia.es
Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

UNA NUEVA VISIÓN DE LA VÍA LÁCTEA

El mejor mapa de nuestra galaxia producido hasta la fecha arroja luz sobre su estructura espiral

EVOLUCIÓN
El inesperado origen de los dedos

CAMBIO CLIMÁTICO
Impacto en las redes tróficas de la Antártida

ECONOMÍA
¿Cuál debería ser el precio de contaminar?

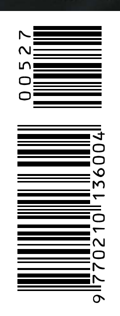




ILUSTRACIÓN DE CHASE STONE

ARTÍCULOS

ASTRONOMÍA

22 Una nueva visión de la Vía Láctea

Los recientes esfuerzos por cartografiar la estructura espiral de la galaxia, mediante varios proyectos que emplean la interferometría de muy larga base, nos brindan una imagen sin precedentes de nuestro hogar cósmico. *Por Mark J. Reid y Xing-Wu Zheng*

FARMACOLOGÍA

30 Inteligencia artificial para descubrir fármacos

La industria farmacéutica atraviesa una mala racha en el desarrollo de medicamentos. ¿Hasta qué punto puede ayudar la inteligencia artificial? *Por David H. Freedman*

EVOLUCIÓN

36 El inesperado origen de los dedos

Un fósil singular revela que los dedos de la mano surgieron antes de que los vertebrados abandonasen el agua para colonizar la tierra firme. *Por John A. Long y Richard Cloutier*

BIOLOGÍA MARINA

44 Las redes tróficas de la Antártida ante el cambio climático

Conocer el mapa de las interacciones entre depredadores y presas permite detectar efectos insospechados del calentamiento global. *Por Tomás I. Marina, Vanesa Anabella Salinas y Georgina Florencia Cordone*

CAMBIO CLIMÁTICO

58 El precio de contaminar

Una combinación de modelos matemáticos y decisiones políticas puede determinar un impuesto viable para reducir las emisiones de CO_2. *Por Gilbert E. Metcalf*

CONSCIENCIA

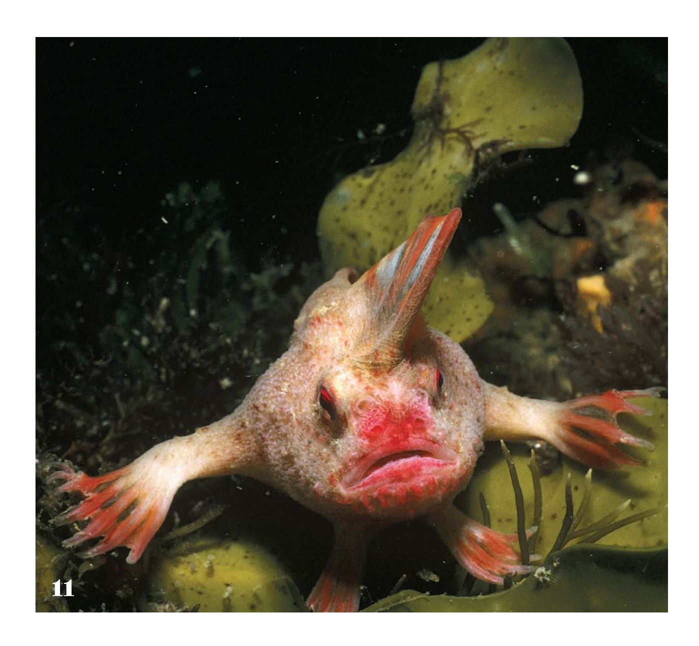
66 Experiencias de la muerte inminente

¿Podrían ayudarnos a entender cómo funciona el cerebro en situaciones límite? *Por Christof Koch*

SOSTENIBILIDAD

72 Vivir con la selva

Los pigmeos de la cuenca del Congo gozaban de una vida ufana, hasta que el progreso y los conservacionistas llegaron de la mano. *Por Jerome Lewis*



52



INVESTIGACIÓN Y
CIENCIA

SECCIONES

3 Cartas de los lectores

4 Apuntes
La transformación de Venus. Huellas de tsunamis. Neuronas convertidas en componentes bioelectrónicos. Indicadores paleoambientales. La supervivencia de los más jóvenes. La fragilidad de los peces con manos. ¿Tortuga macho o hembra?

13 Agenda

14 Panorama
La madera registra la vulnerabilidad de los árboles frente a futuras sequías. *Por Lucía de Soto*
Los miniórganos revelan de qué modo el coronavirus hace estragos en el cuerpo. *Por Smriti Mallapaty*
¿Por qué hay materia en el universo? *Por Silvia Pascoli y Jessica Turner*

52 De cerca
Retina luminosa. *Por Robert Gast*

54 Historia de la ciencia
Mirar a los elefantes e ignorar los carteles.
Por Oliver Hochadel

56 Foro científico
El triaje de los pacientes de COVID-19
Por Marta Consuegra y María Casado

82 Curiosidades de la física
El sonido de una gota de agua.
Por H. Joachim Schlichting

84 Juegos matemáticos
Sucesiones sin regularidades. *Por Patrick Honner*

88 Correspondencias
Rudolf Virchow, activista médico y social.
Por José Manuel Sánchez Ron

92 Libros
¿Mecánica cuántica o misticismo cuántico? *Por Miguel Á. Vázquez-Mozo*
Ética de la edición genómica. *Por Luis Alonso*

96 Hace...
50, 100 y 150 años.

EN PORTADA

La interferometría de muy larga base, una técnica radioastronómica que combina las imágenes simultáneas de diversos telescopios de todo el mundo, nos ha brindado una visión sin precedentes de la estructura de la Vía Láctea. El mapa resultante muestra que nuestra galaxia posee cuatro brazos espirales y que el Sol se encuentra muy cerca del plano central del disco galáctico. Ilustración de Ron Miller.



redaccion@investigacionyciencia.es



Febrero 2020

AGUJEROS NEGROS, LOCALIDAD Y ENTRELAZAMIENTO

En «Cómo fugarse de un agujero negro» [Investigación y Ciencia, febrero de 2020], Steven B. Giddings dibuja una visión actualizada de las distintas soluciones que se han propuesto en los últimos años para resolver el problema de la información en los agujeros negros: la aparente paradoja que surge al combinar las leyes cuánticas y la relatividad general, y que sugiere que los agujeros negros destruirían la información, a pesar de que la mecánica cuántica impone que la información no puede perderse nunca.

No obstante, hay algo en el artículo que me ha resultado confuso. Giddings explica que las tres propuestas principales para resolver la paradoja de la información tienen en común el mismo problema: todas violan de una forma u otra el principio de localidad, la condición de que ningún efecto físico puede propagarse por el espacio a una velocidad mayor que la de la luz.

Sin embargo, he leído varias veces en otros sitios que la violación del principio de localidad ha sido ya firmemente establecida tanto por los experimentos como por las consideraciones teóricas relativas al entrelazamiento cuántico. Si esto es así, ¿por qué se considera tan problemática la violación del principio de localidad en el caso de los agujeros negros? ¿Y por qué Giddings no menciona en su artículo que los efectos no locales han sido confirmados en los estudios sobre el entrelazamiento?

Bruce Ecker
Nueva York

Responde Giddings: *La pregunta del lector refleja un malentendido muy extendido sobre el significado del principio de localidad en física. Es cierto que la mecánica cuántica exhibe algunos efectos —en particular, el entrelazamiento cuántico— que parecen implicar un tipo de comportamiento no local. Y es conocido que este fenómeno inquietó sobremanera a Albert Einstein, quien describió sus consecuencias con la célebre expresión «fantasmal acción a distancia».*

Sin embargo, la teoría cuántica de campos reconcilia a la perfección el principio de localidad con la mecánica cuántica. Aunque por supuesto esta teoría también permite el entrelazamiento, lo que quiere decir aquí el principio de localidad es que resulta imposible enviar ningún tipo de señal (es decir, transmitir información) a una velocidad mayor que la de la luz. Y por sí solo, el entrelazamiento cuántico no permite en absoluto esta clase de señalización.

Es esta propiedad local de las teorías cuánticas de campos la que entra en conflicto directo con la afirmación de que, aparentemente, la información ha de escapar de un agujero negro y de que eso nos obliga a considerar modificaciones de la teoría.

> «¿De qué manera un cambio en la densidad del agua marina dificulta el transporte de nutrientes?»
> —*Miguel Ramos Navarro, Córdoba*

MAR CALIENTE

En «El trópico llega al Mediterráneo» [Investigación y Ciencia, junio de 2020], Roberto Danovaro explica que «el calentamiento de las aguas superficiales está creando una "barrera física" (de densidad) entre las aguas superficiales, más cálidas, y las aguas profundas, más frías, que reduce la cantidad de lluvia [de materia orgánica] que cae hasta el fondo marino».

¿A qué se refiere con «barrera de densidad»? ¿De qué manera un cambio de densidad dificulta el transporte de nutrientes? ¿Qué procesos físicos o químicos intervienen?

Miguel Ramos Navarro
Córdoba

Responde Danovaro: *La temperatura modifica la densidad de todos los líquidos, incluida el agua. En concreto, la densidad disminuye cuando la temperatura aumenta. La luz solar calienta primero las aguas superficiales, las cuales se vuelven menos densas («más ligeras») que el agua situada más abajo. Esa diferencia de densidad es imperceptible para nosotros, pero para una partícula muy pequeña (del tamaño de micrómetros, más fina que el polvo) y con una densidad muy similar a la del agua marina, ese aumento de densidad hace más difícil que la partícula se hunda, por lo que actúa como una barrera.*

Al mismo tiempo, si una partícula de materia orgánica permanece durante más tiempo en las aguas superficiales, más cálidas, se hidrolizará con rapidez (degradada por las bacterias) y perderá la mayor parte de su capacidad nutricional.

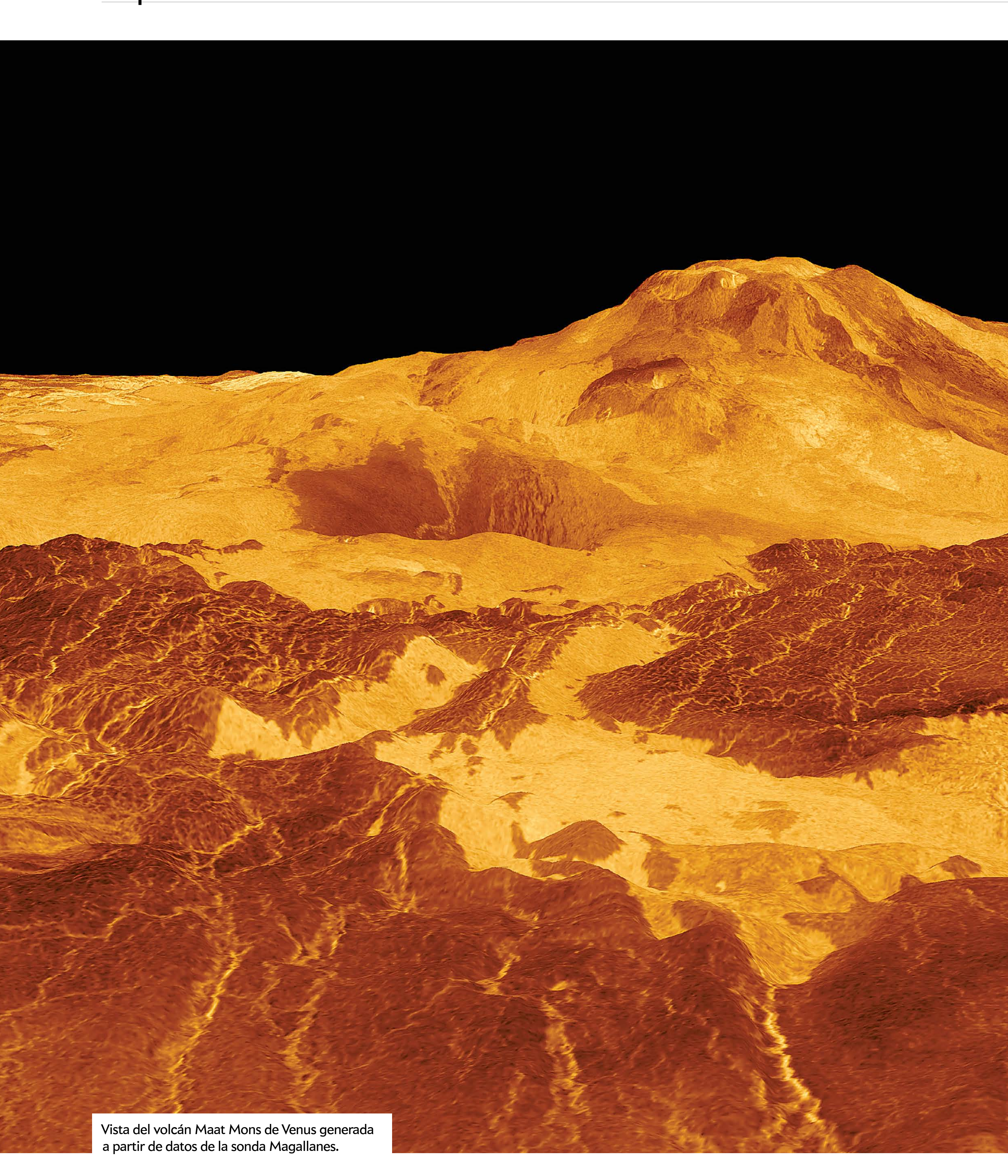


Junio 2020

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S. A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.



Vista del volcán Maat Mons de Venus generada a partir de datos de la sonda Magallanes.




ALAMY

PLANETOLOGÍA

La transformación de Venus

Un estudio señala que el planeta fue habitable y explica cómo pudo convertirse en un mundo inhóspito

Bajo las tóxicas nubes de ácido sulfúrico de Venus se oculta un mundo apocalíptico, con temperaturas que podrían fundir el plomo y presiones capaces de aplastar maquinaria pesada. Pero quizá no siempre fue así.

En 2016, Michael Way, del Instituto Goddard de Estudios Espaciales de la NASA, y sus colaboradores aplicaron un modelo climático tridimensional al Venus primigenio y descubrieron que podría haber presentado temperaturas tan suaves como para albergar vastos océanos de agua líquida, el componente esencial de la vida tal y como la conocemos. Ahora Way y Anthony del Genio, también del Instituto Goddard, han desarrollado un marco teórico para la evolución del planeta basado en datos más complejos, que incluyen diversas topografías y cantidades de luz solar. Su estudio, publicado en mayo en *Journal of Geophysical Research: Planets*, explica de forma novedosa cómo Venus podría haber sido habitable durante casi tres mil millones de años antes de transformarse en el infierno abrasador que es hoy.

Muchos científicos han postulado que Venus nunca albergó agua líquida. Hace unos 4500 millones de años, cuando se formó el sistema solar, el planeta habría recibido suficiente luz solar como para que el agua de su atmósfera escapara al espacio, y la radiación habría frustrado la aparición de la vida. Sin la presencia de algún factor mitigante «no habría habido nada», confirma Way. Él y Del Genio piensan que ese factor es una nube de gran tamaño que podría haber aparecido en las etapas tempranas de la evolución de Venus y haber enfriado el planeta.

A diferencia de la Tierra, Venus no rota sobre su eje una vez cada 24 horas, sino cada 243 días terrestres. Dado que tarda un tiempo similar en completar una vuelta alrededor del Sol (225 días terrestres), una cara del planeta disfruta largamente de la luz so-

lar mientras la otra está sumida en una prolongada oscuridad. Una atmósfera espesa podría favorecer la circulación de calor del lado diurno al nocturno y mantener Venus caliente. Pero en el modelo de Way y Del Genio, una enorme nube sobre la cara diurna actuaría como un escudo brillante que reflejaría la luz solar incidente y produciría temperaturas lo bastante bajas como para sustentar agua líquida.

La idea de que Venus fue habitable en algún momento no es nueva, pero el presente modelo muestra cómo podría haberse transformado en un planeta inhóspito y descarta las teorías habituales. «Hay una historia sobre Venus que nos contamos a nosotros mismos. La enseñamos en los cursos de astronomía y la escribimos en los libros», afirma David Grinspoon, astrobiólogo del Instituto de Ciencias Planetarias de EE.UU. que no participó en el estudio, si bien fue uno de los autores del artículo de 2016. «Y resulta que esa historia no es correcta.»

La idea tradicional es que el aumento gradual del brillo del Sol calentó tanto el planeta que este dejó de poder albergar un océano estable. En otras palabras, el borde interior de la zona habitable (la región orbital donde el agua líquida puede crear las condiciones propicias para la vida) se desplazó más allá del segundo planeta del sistema solar. Sin embargo, el modelo de Way y Del Genio sugiere que la cubierta de nubes habría proporcionado suficiente sombra como para mantener agua líquida en la superficie de Venus incluso hasta hoy en día, si algo no hubiera llevado al planeta a su estado actual.

Los autores proponen un mecanismo violento que podemos entender fijándonos en la Tierra primitiva. Hace unos 250 millones de años, se abrieron profundas grietas en la corteza terrestre; eso arrojó lava a la superficie y suficiente dióxido de carbono a la atmósfera como para producir la mayor extinción masiva de nuestro planeta: perecieron el 96 por ciento de las especies marinas y el 70 por ciento de las terrestres. Tales episodios volcánicos dejan tras de sí depósitos conocidos como grandes provincias ígneas y producen al menos 100.000 kilómetros cúbicos de lava a lo largo de un millón de años. «La cantidad de lava que brota por unidad de tiempo constituye una afrenta a Dios», asegura Paul Byrne, geólogo planetario de la Universidad Estatal de Carolina del Norte ajeno al estudio.

Aunque estas erupciones han sacudido la Tierra en diversas ocasiones y a menudo han causado extinciones masivas, nunca han ocurrido varias a la vez. «Es una suerte para la vida en la Tierra», apunta Way, pero los científicos no ven ninguna razón por la que no pueda darse más de un evento simultáneamente. Y si eso hubiera sucedido en Venus, se habría liberado suficiente dióxido de carbono a la atmósfera como para convertir el planeta en un invernadero apocalíptico, según los investigadores.

La hipótesis es atractiva. «Hay cierto romanticismo trágico en la aniquilación de un mundo tan parecido al nuestro», opina Byrne. «Mi sueño es que un día aterricemos allí y hallemos fósiles de un mar poco profundo perteneciente a un ecosistema de Venus.»

PALEOSISMOLOGÍA

Huellas de tsunamis

Unos restos enterrados sugieren que un antiguo tsunami sacudió África oriental

Excavación cerca del rio Pangani, en Tanzania.

DAVIDE OPPO

El terremoto acaecido en el océano Índico en 2004 generó un tsunami que se desplazó rápidamente desde Sumatra y devastó las costas del sureste asiático, pero causó muchos menos daños cuando llegó a África. Eso ha llevado a muchos científicos a pensar que el riesgo de tsunamis en algunas partes del este de África es relativamente bajo. Pero el estudio de una capa de arena de hace 1000 años y llena de huesos humanos, situada en la bahía de Pangani, en el noreste de Tanzania, ha vuelto a poner la amenaza de una ola monstruosa en el punto de mira.

Un equipo internacional de geólogos combinó su análisis de la capa de arena con simulaciones de escenarios sísmicos, complementando el trabajo de campo realizado durante años por los arqueólogos de la Universidad de Dar es Salaam. El equipo halló indicios de que un tsunami procedente de la zona de subducción de Sumatra-Andamán (que también fue la fuente del devastador tsunami de 2004) destruyó un antiguo asentamiento pesquero de la bahía de Pangani. El primer autor del estudio, Vittorio Maselli, de la Universidad Dalhousie de Nueva Escocia, tomó parte en él como explorador de *National Geographic*. El trabajo se publicó en línea el pasado mayo en *Geology*.

En la capa de arena, los investigadores hallaron restos de fauna marina diminuta arrastrada desde el océano y huesos humanos rotos que no podían atribuirse a enfermedades, actos violentos o entierros tradicionales. «Considerando todo, el tsunami era la mejor interpretación», afirma Maselli.

No obstante, el experto admite que no hay pruebas directas que apoyen esta visión.

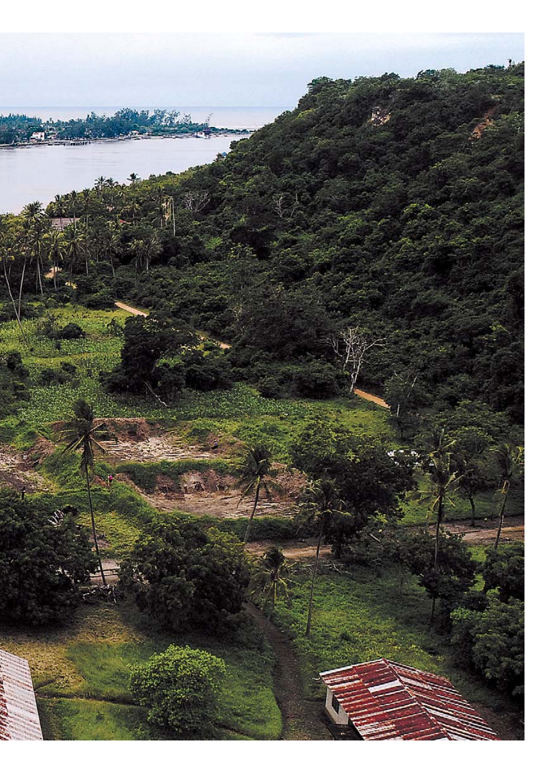
Los autores sostienen que el vulcanismo a gran escala habría seguido pavimentando gran parte del planeta con roca volcánica, produciendo el resultado que vemos hoy en día. Pero Vicki Hansen, geóloga de la Universidad de Minnesota Duluth que no participó en el estudio, señala que las observaciones de la sonda Magallanes, que orbitó en torno a Venus a comienzos de los años noventa, no respaldan su idea. «Los datos contradicen todo eso», asevera. Según el análisis del equipo de Hansen, «podemos identificar tres eras distintas en la evolución de Venus; eso no es compatible con una renovación de la superficie debida a un evento catastrófico, la cual habría borrado toda la historia anterior».

La cuestión sin duda es polémica, y algunos científicos siguen defendiendo que Venus nunca fue apto para la vida. Para esclarecerlo, los investigadores tendrán que examinar el planeta vecino más de cerca. «Podemos pasarnos la vida construyendo modelos, pero eso no soluciona nada», sentencia Hansen. «Hay que comprobar los resultados de esos modelos.»

Byrne cree que deberíamos enviar a Venus una flota de naves espaciales, con orbitadores, módulos de aterrizaje, globos aerostáticos, plataformas aéreas e incluso dirigibles. La atmósfera del planeta puede darnos pistas sobre cuánta agua se ha perdido, y la superficie podría revelar si las erupciones volcánicas la fisuraron y cuándo lo hicieron. Las futuras misiones podrían ayudar a zanjar el debate sobre si Venus reunió en algún momento las condiciones necesarias para la vida y obligar a los astrónomos a ampliar su búsqueda de planetas habitables en la galaxia.

«Si este escenario es correcto, eso supone que los planetas similares a Venus tienen posibilidades reales de albergar vida y no deberíamos ignorarlos», apunta Adrian Lenardic, geofísico de la Universidad Rice que tampoco tomó parte en la investigación. «Habría que buscar allí.»

—Shannon Hell



El trabajo podría poner la primera piedra para evaluar el riesgo de tsunamis a lo largo de la vasta costa oriental africana, llena de capas de arena enterradas y fondos oceánicos sin cartografiar. Y los resultados se ajustan a lo observado en otros lugares: al otro lado del océano Índico, los investigadores han hallado depósitos de tsunamis similares, de hace miles de años, en muchas de las zonas costeras que registraron más víctimas en 2004. «Quizá lo más interesante del estudio es que concuerda con lo que han observado algunos de mis colegas en la costa oriental de la India», valora Emile Okal, sismólogo de la Universidad del Noroeste que no participó en la nueva investigación. «Desde un punto de vista geológico, creo que es una gran contribución.»

Aunque harán falta nuevos trabajos para dilucidar el alcance de la amenaza, los investigadores sostienen que su estudio identifica un riesgo natural muy real para esta región en rápida urbanización, y que los constructores deberían tenerlo en cuenta. «Me parece relevante para proyectos de infraestructuras a largo plazo», señala Andrew Moore, geólogo del Colegio Earlham y uno de los autores del estudio. «Este es un llamamiento para salir a buscar» depósitos de tsunamis en otros sitios.

Realizar más investigaciones puede ayudar a que las futuras urbes del este de África mitiguen el riesgo, según Maselli. «De momento, nuestro conocimiento se limita a un solo punto en todo el continente africano. Lo que estamos diciendo es: “Mirad, hemos descubierto algo... Volvamos a África oriental y sigamos aprendiendo”.»

—Christian Fogerty

NEUROBIOLOGÍA

Neuronas convertidas en componentes bioelectrónicos

Una novedosa técnica transforma estas células para que construyan en el cuerpo estructuras conductoras de electricidad

Nuevas investigaciones podrían convertir el elemento básico de la biología, la célula, en una pieza para la construcción de materiales y estructuras en el interior de los seres vivos. Publicado en marzo en *Science*, un estudio a cargo de Karl Deisseroth, psiquiatra y bioingeniero de la Universidad Stanford, describe un método para que ciertas células sinteticen en su superficie polímeros que conduzcan (o aíslen) la electricidad. El trabajo podría algún día permitir la fabricación de estructuras a gran escala en el interior del cuerpo o mejorar las interconexiones cerebrales con las extremidades protésicas.

A medio plazo, la técnica podría emplearse en la medicina bioeléctrica, que se basa en la generación de impulsos eléctricos con fines terapéuticos. A los investigadores de esta disciplina hace tiempo que les interesaba incorporar polímeros que condujesen o inhibieran la electricidad sin dañar los tejidos circundantes. La estimulación de neuronas concretas (para intervenir en una crisis epiléptica, por ejemplo) es mucho más precisa que inundar el cuerpo con fármacos, que pueden traer consigo amplios efectos secundarios. Pero los actuales métodos bioeléctricos, como los basados en el uso de electrodos, todavía afectan de forma indiscriminada a una gran cantidad de neuronas.

La nueva técnica se sirve de un virus para introducir genes en el tipo de neuronas deseado, a las que les indica que produzcan una enzima (Apex2) en la superficie celular. La enzima cataliza una reacción química entre las moléculas precursoras y el peróxido de hidrógeno, estos últimos infundidos en el espacio intercelular; la reacción provoca que los precursores se fusionen en un polímero en las células deseadas. «La novedad reside en la amalgama de varios campos emergentes en una aplicación», afirma el ingeniero biomédico de la Universidad de Florida Kevin Otto, que no ha participado en la investigación pero sí en el comentario adjunto de *Science*. «El uso de polímeros conductores, ensamblados [en el seno de un tejido vivo] por medio de la biología sintética, como interconectores de células específicas representa una gran novedad.»

Los investigadores ensayaron el proceso y supervisaron el funcionamiento en neuronas de ratón, modelos de cerebro humano cultivados artificialmente y gusanos vivos. También inyectaron los ingredien-

THOMAS FUCHS (*neurona*); GRUPO DE ESPELEOLOGÍA ADES (*cueva*)

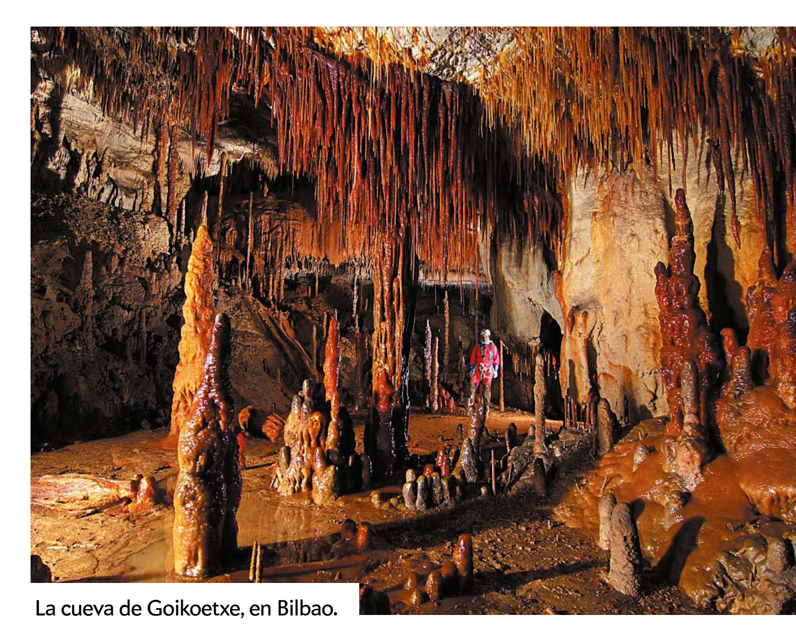
GEOLOGÍA

Indicadores paleoambientales

Las estalagmitas ricas en materia orgánica registran los cambios de su entorno

No muy lejos de la policromática arquitectura de Bilbao, un mundo subterráneo exhibe su propia paleta de colores. Las estalagmitas y estalactitas de la cueva de Goikoetxe no presentan solo el tono blanco habitual: muchas van desde un color miel hasta un rojo intenso. Un nuevo estudio muestra que la coloración de esas formaciones, conocidas en general como espeleotemas, procede de compuestos orgánicos del suelo que fueron lixiviados y transportados por el agua. En un artículo publicado en línea el pasado abril en *Quaternary International*, los investigadores sugieren que los espeleotemas de la cueva de Goikoetxe registran factores ambientales como las precipitaciones.

Virginia Martínez Pillado, paleoclimatóloga del Equipo de Investigación de Atapuerca y del Centro Mixto de Evolución y Comportamiento Humano (dependiente de la Universidad Complutense y el Instituto de Salud Carlos III), caminó y se arrastró por la cueva de Goikoetxe hasta alcanzar su Sala Roja. «Todo en ella es rojo», explica sobre el recinto cubierto de estalagmitas y estalactitas. Ella y sus colaboradores transportaron al laboratorio cuatro estalagmitas y anali-



La cueva de Goikoetxe, en Bilbao.

zaron sus elementos traza, lo que les permitió descartar que la oxidación del hierro (que a menudo causa una coloración roja, por ejemplo en Marte) fuera la responsable en este caso.

Los materiales orgánicos también pueden conferir un tono rojizo, así que los científicos estudiaron la composición de las estalagmitas.

tes en cerebros de ratones vivos para descartar toda toxicidad.

Los autores del comentario afirman que el trabajo podría abrir el camino a la mejora de los tratamientos contra la depresión o la enfermedad de Parkinson al aumentar la precisión del tipo de neurona que es estimulada. También permitiría actuar con precisión sobre las células transmisoras de la información al cerebro, por ejemplo, para que los portadores de extremidades protésicas recuperen la sensibilidad.

Deisseroth vislumbra aplicaciones aún más amplias para la investigación. «Hemos logrado construir estructuras nuevas en células de interés que modificamos genéticamente, así que solo estas construyen lo que les indicamos; resulta bastante atrayente y muy muy general», explica. «Es una exploración de la ciencia básica: ¿qué podemos hacer? ¿Qué podemos construir en el seno de estructuras biológicas aprovechando su complejidad estructural?»

Con todo, persisten algunos obstáculos. «La aplicación de la terapia génica en los humanos tropieza con escollos legales», aclara Otto. También habrá que demostrar que los cambios son duraderos y que la técnica es viable en las especies superiores, concluye.

—*Simon Makin*

Las medidas de dispersión y absorción de la luz revelaron que contenían ácidos húmicos y fúlvicos, moléculas complejas que se forman a partir de plantas descompuestas. El equipo concluyó que el agua debía haberlas recogido y depositado en las estalagmitas mientras estas crecían, a lo largo de miles de años.

Así pues, los espeleotemas podrían mostrar las condiciones ambientales del pasado. Por ejemplo, una variación en las precipitaciones influiría en la cantidad de materia orgánica arrastrada a la cueva, señala Alison Blyth, geoquímica de la Universidad Curtin de Perth, que no tomó parte en el estudio. «Midiendo las huellas químicas preservadas en cada capa, podemos reconstruir cómo han ido variando diversos parámetros ambientales.» Actualmente, Martínez Pillado y sus colaboradores analizan las estalagmitas para determinar antiguos cambios en las precipitaciones y en la vegetación situada sobre la cueva de Goikoetxe. Según los investigadores, esta técnica también puede aplicarse a otras cuevas con espeleotemas ricos en materia orgánica.

—*Katherine Kornei*

TECNOLOGÍA

Controlar los mosquitos con lídar

Los progresos con esta técnica ayudan a detectar los movimientos de los insectos

En el curso de un eclipse solar acaecido en 2016, investigadores de la Universidad de Lund proyectaron un haz de láser infrarrojo en el oscurecido cielo de Tanzania para averiguar la reacción de los insectos a esa inusual penumbra. Después, prosiguieron con las observaciones otras cinco noches y cuatro días. El sistema láser que usaron, llamado lídar, detectó más de 300.000 insectos durante ese tiempo.

Muchos de esos insectos son los más mortíferos del mundo: los mosquitos. Uno de sus géneros es portador del parásito que cada año causa medio millón de muertes por paludismo. Durante la «hora punta» matinal y vespertina de los mosquitos, los investigadores detectaron que un gran número alzaba el vuelo prácticamente a la misma hora cada día. El eclipse también convocó a una nube enorme de mosquitos. Todo indica que en la naturaleza es el nivel de luz, y no tanto los ritmos circadianos, el que dicta la actividad de estos dípteros. Resulta significativo que el estudio, publicado en mayo en *Science Advances*, también ilustre las posibilidades del lídar en el análisis de riesgos y la adopción de medidas preventivas contra el paludismo, así como en la recogida de datos entomológicos.

La investigación supone «la primera vez que se clasifican varios tipos de insectos en su medio natural», afirma Mikkel Brydegaard, autor principal del estudio y físico en Lund.

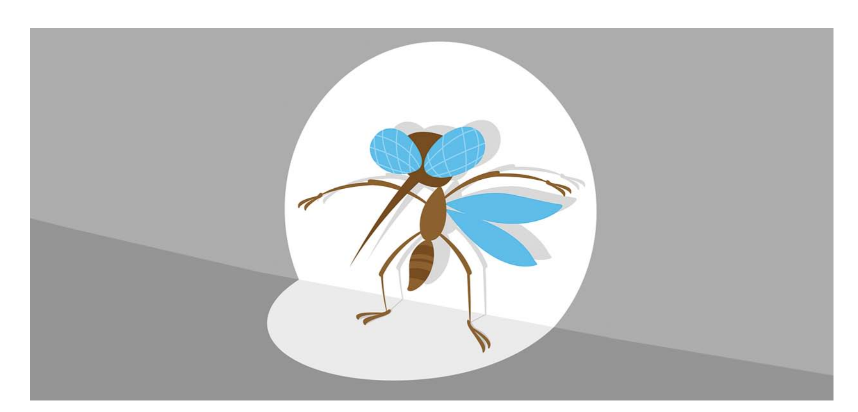
En el estudio se puso a prueba un tipo de lídar entomológico ideado por él mismo que ha sido adoptado en todo el mundo. Cada insecto que vuela a través del haz del lídar refleja la luz, que incide en un telescopio. La retrodispersión de esa luz se analiza para calcular la frecuencia del aleteo y para determinar a partir de ella la cantidad y el tipo de insectos en vuelo. El equipo identificó mosquitos, polillas, moscas y jejenes, y llegó a diferenciar hasta los mosquitos machos de las hembras.

Quienes luchan contra el paludismo suelen usar trampas para capturar mosquitos que se hallan en distintas fases del ciclo biológico, que después analizan en el laboratorio. Pero este método es laborioso y caro y no permite evaluar las poblaciones a lo largo del tiempo ni la eficacia de las fumigaciones o de otras medidas de control aplicadas en el campo.

«Con este tipo de lídar se ha demostrado que, ya sea en condiciones de eclipse o normales, es posible seguir una población con una precisión muy superior», afirma Benjamin Thomas, físico del Instituto Tecnológico de Nueva Jersey que no ha participado en el estudio pero forma parte del colectivo cada vez mayor de entomólogos que está experimentando con el lídar. «La posibilidad de observar miles y miles de insectos abre la puerta por fin al seguimiento de esas poblaciones.»

Los autores afirman que las instalaciones de lídar podrían emitir alertas por riesgo de paludismo, de igual modo que una estación meteorológica avisa de las tormentas inminentes. Y el seguimiento de los mosquitos sería solo una de las aplicaciones; también serviría para detectar la diversidad de polinizadores y vigilar las plagas en cultivos o zonas protegidas, explica Brydegaard.

—*Susan Cosier*



THOMAS FUCHS

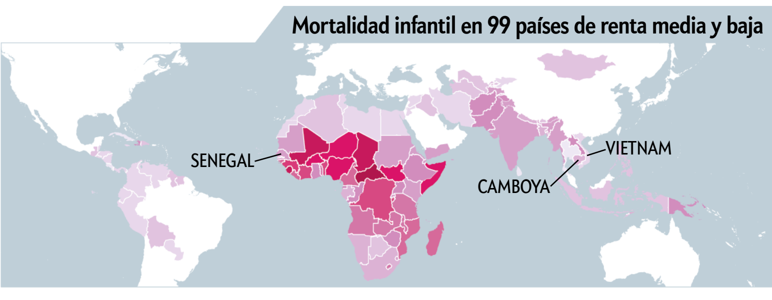
SALUD PÚBLICA

La supervivencia de los más jóvenes

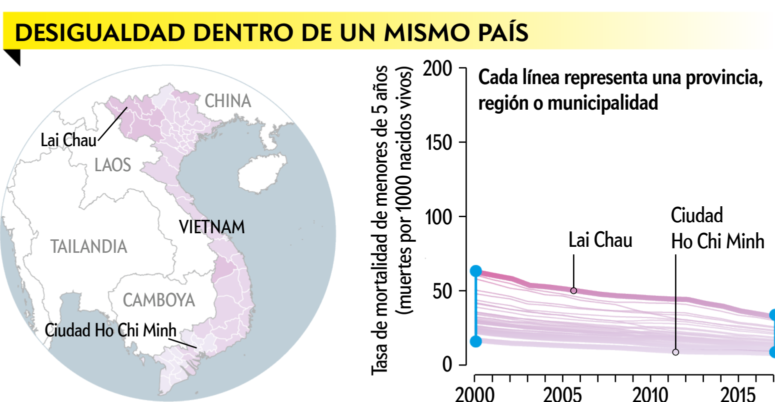
La mortalidad infantil está disminuyendo, pero en muchos países aún se observan grandes diferencias regionales

Las acciones encaminadas a alcanzar los objetivos de las Naciones Unidas han reducido la tasa de mortalidad de los niños menores de cinco años (TMM5) de 93 muertes por 1000 nacidos vivos en 1990 a 39 en 2018. Algunos de los descensos más acusados se han registrado en países de renta media y baja, los cuales suelen presentar mayores índices de mortalidad en ese grupo de edad. Pero un artículo publicado en *Nature* revela otros matices. Los autores estudiaron la TMM5 en distritos, municipios, provincias o estados de 99 naciones de renta media y baja entre 2000 y 2017, y hallaron importantes variaciones internas en muchos países, sobre todo en aquellos con una tasa total especialmente alta o baja. En otros casos, empero, las diferencias regionales se han rebajado de manera notable. Cabe destacar que el cociente entre las muertes de lactantes (menores de 1 año) y las de niños menores de 5 años ha aumentado en algunos países, lo que indica que prevenir los fallecimientos en la primera infancia puede resultar más complicado.

—*Amanda Montañez*

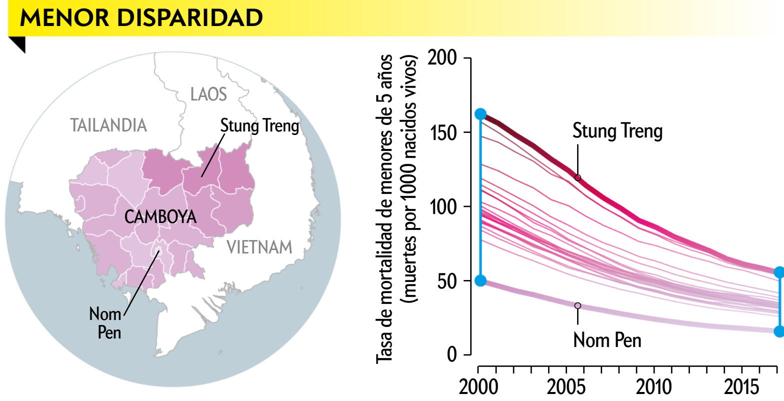


DESIGUALDAD DENTRO DE UN MISMO PAÍS



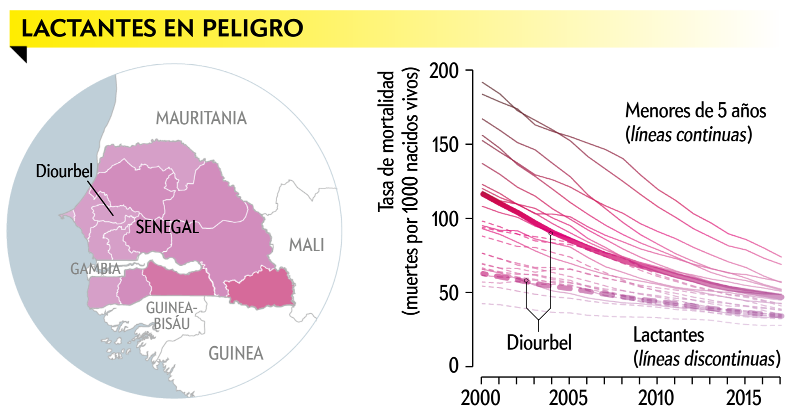
La TMM5 de Vietnam es relativamente baja, pero la desigualdad entre sus regiones ha impedido que se reduzca de manera sustancial la brecha entre las tasas más altas y las más bajas. Entre 2000 y 2017, la TMM5 en la provincia de Lai Chau se mantuvo unas cuatro veces mayor que la de Ciudad Ho Chi Minh.

MENOR DISPARIDAD



En Camboya, la TMM5 es superior a la del vecino Vietnam, pero las variaciones regionales han disminuido sensiblemente: la diferencia entre la TMM5 más alta del país y la más baja se redujo casi tres veces entre 2000 y 2017.

LACTANTES EN PELIGRO



Aunque la mortalidad de los lactantes (menores de 1 año) ha bajado, el descenso ha sido menos acusado que entre los niños de 1 a 5 años, de modo que ahora contribuye más a la TMM5. Podemos verlo claramente en Diourbel, Senegal, donde las muertes de lactantes pasaron de suponer el 54 por ciento de la TMM5 en 2000 al 73 por ciento en 2017.



Tasa de mortalidad de niños menores de 5 años (TMM5, muertes por 1000 nacidos vivos)

Los mapas muestran las estimaciones de la TMM5 en 2017.
Las gráficas muestran las estimaciones anuales entre 2000 y 2017.

FUENTE: «MAPPING 123 MILLION NEONATAL, INFANT AND CHILD DEATHS BETWEEN 2000 AND 2017», POR ROY BURSTEIN ET AL. EN *NATURE*, VOL. 574, PÁGS. 353-358, OCTUBRE DE 2019; AMANDA MONTAÑEZ (*gráficas*); MAPPING SPECIALISTS (*mapas*).

PSICOLOGÍA

Información no visual

Las propiedades no visibles de los objetos ayudan a encontrarlos

Dedicamos gran parte del día a explorar visualmente una zona en busca de algo que queremos, como las llaves o la sal. El modo en que lo hacemos «permite vislumbrar cómo examina la mente la información que llega a nuestros ojos», asegura Jason Fischer, neurocientífico cognitivo de la Universidad Johns Hopkins. Hasta ahora, se habían estudiado características visuales como el color, la forma y el tamaño de los objetos. Pero sus propiedades físicas intrínsecas (atributos que no vemos pero conocemos por experiencia, como la dureza) también entran en juego.

«Tal vez no podamos ver al instante que un ladrillo pesa más que un refresco y es más duro que un pastel, pero lo sabemos. Y eso determina cómo reaccionamos ante esos objetos», explica Fischer, autor principal de un trabajo publicado en línea en mayo en *Journal of Experimental Psychology: General*. «Nos preguntábamos si ese conocimiento sobre las propiedades físicas ocultas de los objetos nos ayuda a localizarlos más deprisa.»

A los participantes se les mostraba una cuadrícula con las imágenes de diversos objetos, y debían encontrar uno de ellos lo antes posible. Cada cuadrícula incluía cosas más blandas o duras que la buscada pero con un color o una forma similar, para que no fuera posible usar pistas visuales.

Fischer señala que «la gente usaba de manera automática lo que sabía sobre la dureza de un objeto para hallarlo más rápido». Los movimientos oculares de los participantes revelaron que empleaban menos tiempo en examinar aquellos objetos que no poseían la dureza correcta. «Cuando buscamos una cosa, pensar en ella evoca distintos datos útiles que la mente aprovecha para encontrarla en el menor tiempo posible», afirma Fischer. «Es una capacidad innata que utilizamos sin reparar en ello.»

Según Vivian C. Paulun, investigadora de la visión de la Universidad de Giessen ajena al estudio, los resultados muestran que una propiedad táctil puede influir en la atención visual por asociación. «El siguiente paso sería comprobar si ocurre lo mismo con otras propiedades mecánicas no visuales, como la fragilidad. Eso reforzaría los indicios de que los atributos físicos de los objetos guían nuestra atención visual.» *—Jillian Kramer*

El pez con manos rojo (*Thymichthys politus*) también está en peligro crítico.

GETTY IMAGES

CONSERVACIÓN

La fragilidad de los peces con manos

La extinción de una especie de esta familia marca un triste hito

La humanidad ha creído desde siempre que la vastedad del océano impedía hacer mella en él. Pero hoy sabemos que la actividad humana destruye hábitats marinos esenciales, contamina peligrosamente las aguas y acidifica los ambientes marinos. La sobrepesca y la caza abusiva han alterado las cadenas tróficas y han puesto a muchas especies animales en grave peligro y condenando a otras a la extinción, como la vaca marina de Steller. Este pasado marzo, la especie *Sympterichthys unipennis* se ha convertido oficialmente en el primer pez marino de la era moderna que ha sido declarado extinto.

La familia a la que pertenece, los braquionictíidos, o peces con manos, está constituida por 14 peculiares especies bentónicas emparentadas con los demonios marinos o peces anzuelo. A diferencia de la mayoría de los peces, carecen de fase larvaria y apenas se desplazan en su vida adulta, características que los hacen vulnerables a los cambios ambientales, según Graham Edgar, ecólogo marino en la Universidad de Tasmania. «Pasan la mayor parte del tiempo inmóviles sobre el lecho marino, con algún aletazo ocasional de pocos metros cuando se les molesta. Y como no pasan por una fase de larva son incapaces de dispersarse a otros lugares. Es por eso que las poblaciones de braquionictíidos están muy localizadas y son vulnerables a las amenazas», explica Edgar. Añade que en 1996, otra especie, el pez con manos moteado (*Brachionichthys hirsutus*) fue el primer pez marino clasificado como en peligro crítico en la Lista Roja de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza.

Se presume que *S. unipennis* era abundante antaño, pues fue uno de los primeros peces descritos por los exploradores europeos en Australia. Ahora nadie ha visto ninguno desde hace más de un siglo, pese a las reiteradas búsquedas en su área de distribución conocida (algunas a cargo del propio Edgar y sus colaboradores). Las directrices de la Lista Roja definen oficialmente «extinto» cuando «no queda ninguna duda razonable de que el último individuo vivo ha muerto». Edgar y los miembros del Equipo Nacional de Recuperación de los Braquionictíidos de Australia no tuvieron más remedio que llegar a esa conclusión a inicios de año, así que en la Lista Roja ha sido clasificado como extinto. No están seguros de lo que ha acabado con él, pero otras especies afines de la región están amenazadas por la pesca de arrastre, la contaminación y el cambio climático.

Edgar afirma que otros tipos ya podrían haber desaparecido, si bien aún no es posible afirmarlo con rotundidad. Y muchos más están en peligro crítico. «Quizá resulte difícil concebir por qué podría ser importante un animal pequeño que ocupa un nicho mínimo en un lugar que pocas personas verán en su vida. Pero ahora mismo una enzima obtenida de un raro microbio extremófilo se está usando en las pruebas que diagnostican la COVID-19», reflexiona Katie Matthews, directora científica de la organización conservacionista Oceana. «La biodiversidad es importante, aunque no podamos verla con nuestros ojos.»

Estas noticias deberían ser una llamada de alerta: «Otras especies de peces con manos están amenazadas, pero con medidas acertadas podríamos paliar ese riesgo», concluye Matthews. *—David Shiffman*

ESPACIO

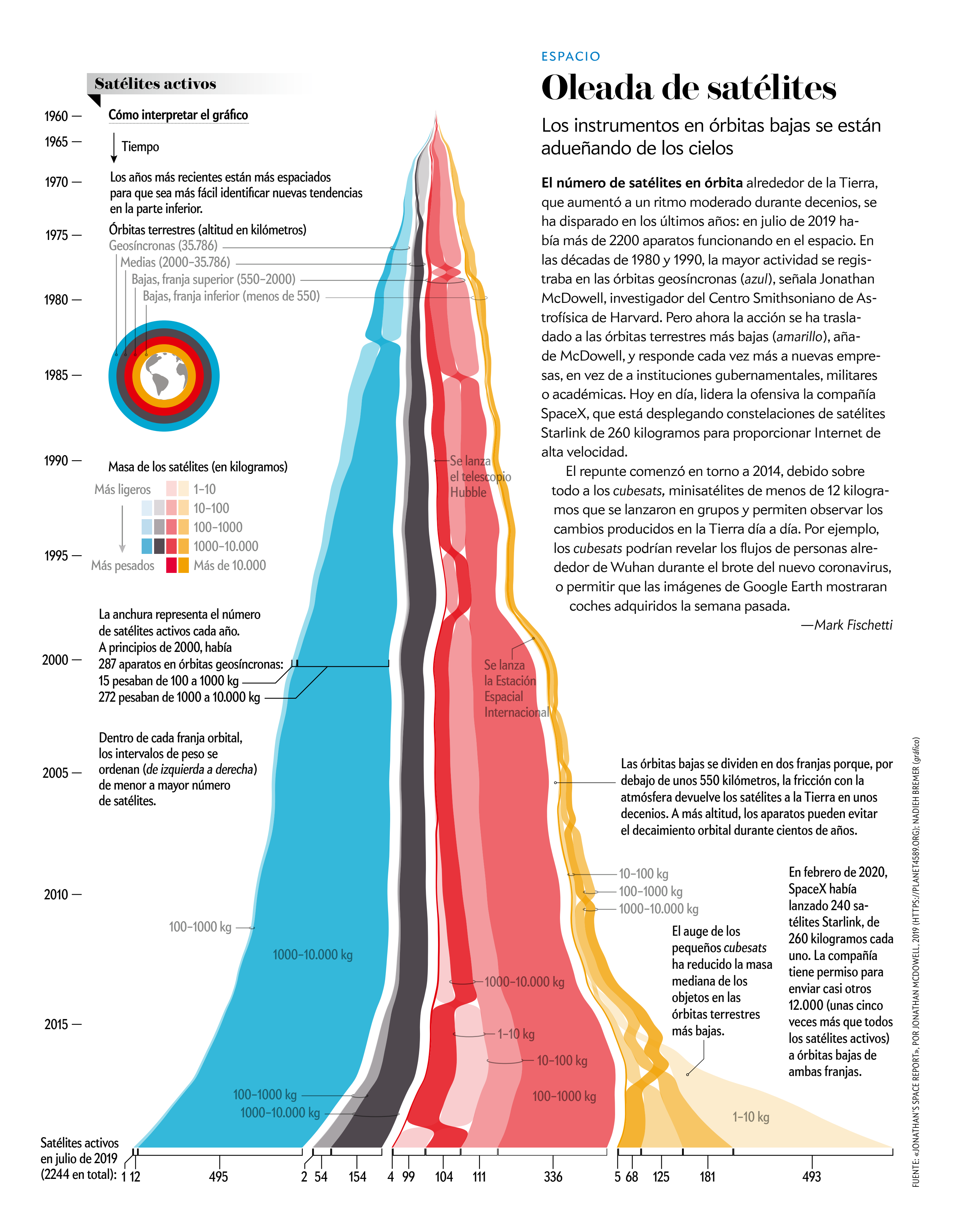
Oleada de satélites

Los instrumentos en órbitas bajas se están adueñando de los cielos

El número de satélites en órbita alrededor de la Tierra, que aumentó a un ritmo moderado durante decenios, se ha disparado en los últimos años: en julio de 2019 había más de 2200 aparatos funcionando en el espacio. En las décadas de 1980 y 1990, la mayor actividad se registraba en las órbitas geosíncronas (*azul*), señala Jonathan McDowell, investigador del Centro Smithsoniano de Astrofísica de Harvard. Pero ahora la acción se ha trasladado a las órbitas terrestres más bajas (*amarillo*), añade McDowell, y responde cada vez más a nuevas empresas, en vez de a instituciones gubernamentales, militares o académicas. Hoy en día, lidera la ofensiva la compañía SpaceX, que está desplegando constelaciones de satélites Starlink de 260 kilogramos para proporcionar Internet de alta velocidad.

El repunte comenzó en torno a 2014, debido sobre todo a los *cubesats*, minisatélites de menos de 12 kilogramos que se lanzaron en grupos y permiten observar los cambios producidos en la Tierra día a día. Por ejemplo, los *cubesats* podrían revelar los flujos de personas alrededor de Wuhan durante el brote del nuevo coronavirus, o permitir que las imágenes de Google Earth mostraran coches adquiridos la semana pasada.

—*Mark Fischetti*





Tortugas bobas recién nacidas.

BIOLOGÍA

¿Tortuga macho o hembra?

Un nuevo análisis de sangre indica el sexo de las recién nacidas

Saber el sexo de las tortugas recién nacidas se ha convertido en una tarea tan esencial como difícil. En muchas especies de quelonios, el desarrollo sexual del embrión depende de la temperatura ambiental, por lo que el calor en alza está generando un exceso de hembras y escasos machos. Si no se controla, este desequilibrio podría condenar a la extinción a algunas especies.

Para acudir en su rescate «hay que saber dónde radica el problema», según Jeanette Wyneken, bióloga de la Universidad Atlántica de Florida y autora principal de un nuevo estudio sobre la cuestión, publicado en marzo en *Scientific Reports*. El seguimiento de las proporciones sexuales en las tortugas recién nacidas ayudaría a conocerlo, pero las especies en que el sexo depende de la temperatura carecen de cromosomas sexuales y maduran relativamente tarde, lo que dificulta la tarea de identificar el sexo con métodos incruentos.

El equipo de Wyneken ha diseñado un análisis de sangre que logró determinar el sexo de crías de galápago de Florida (*Trachemys scripta*) y de tortuga boba (*Caretta caretta*) con una precisión del cien por cien hasta el segundo día de vida. En las jóvenes bobas de más edad, los resultados arrojaron un meritorio 90 por ciento de precisión. En una minúscula muestra de sangre, el análisis busca una hormona que impide la aparición del oviducto en los machos incipientes. (La hormona interviene en otras funciones durante el crecimiento de las tortugas, explica Wyneken, lo que puede complicar los resultados en las hembras de semanas o meses de vida.)

A continuación, los investigadores usaron dos técnicas convencionales para verificar los resultados de las tortugas. Analizaron muestras de tejido de las gónadas de sus 10 tortugas de Florida, que fueron sacrificadas al nacer, y de cinco bobas, que fueron halladas muertas en sus nidos. También criaron 54 tortugas bobas jóvenes hasta entre 83 y 177 días de vida antes de practicar laparoscopias sin muerte.

Ese tipo de exploraciones no pueden practicarse con seguridad en las crías de pocos días, afirma Wyneken. El grupo está trabajando en una versión de campo del análisis de sangre. Esperan supervisar con ella las proporciones sexuales en las recién nacidas en libertad, fáciles de atrapar, y quizás hallar modos de intervenir en el medio, como proporcionar sombra o aspersores refrigerantes durante la incubación. A diferencia de los métodos actuales que requieren dar muerte a las crías o estimar la proporción sexual a partir de la temperatura del nido, la nueva técnica «supone un método inofensivo y fiable para determinar el sexo de las crías», afirma Camryn Allen, endocrinólogo animal en el Centro de Investigaciones Pesqueras de las islas del Pacífico, que no ha participado en el estudio.

—*Rachel Crowell*

ROGER DE LA HARPE, GETTY IMAGES (*tortugas*); MUSEO DE ARQUEOLOGÍA DE CATALUÑA (*pintura rupestre*)

AGENDA

CONFERENCIAS VIRTUALES

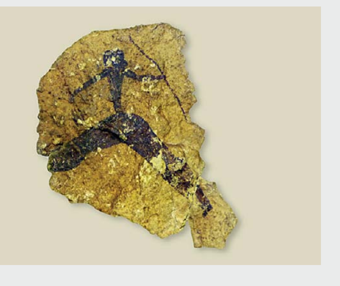
Del 19 de agosto al 3 de septiembre
Ciclo de conferencias sobre la COVID-19
Charlas impartidas por expertos en el campo
Universidad Internacional de Andalucía
www.unia.es

EXPOSICIONES

Tocar el cielo. Explorar el espacio
Parque de las Ciencias
Granada
www.parqueciencias.com

Antropoceno: Arte y biodiversidad en escenarios periurbanos
Museo de la Ciencia y el Agua
Murcia
cienciayagua.org

Arte primero: Artistas de la prehistoria
Museo de Arqueología de Cataluña
Barcelona
www.macbarcelona.cat



Proyectos emergentes 2020
Museo de Ciencias Naturales
Universidad de Zaragoza
Zaragoza
museonat.unizar.es

OTROS

Hasta el 15 de agosto
2030: Un horizonte en el espacio
Concurso de relatos
Convoca: Orbitando
orbitando.space

Hasta el 16 de agosto
#CienciaenMemes
Concurso de memes científicos
Convoca: Delegación del CSIC en Cataluña
www.dicat.csic.es

27 y 28 de agosto – Curso virtual
Matemáticas vs. COVID-19
Universidad Internacional Menéndez Pelayo
www.uimp.es

ECOLOGÍA

La madera registra la vulnerabilidad de los árboles frente a futuras sequías

Los anillos de crecimiento del tronco pueden utilizarse como indicadores del riesgo de mortalidad ante una nueva perturbación

LUCÍA DE SOTO



GETTY IMAGES/THEPICTHING/ISTOCK

DESPUÉS DE UN EPISODIO DE SEQUÍA EXTREMA algunos árboles sucumben. El riesgo individual de morir depende de su respuesta a episodios anteriores y puede conocerse a través del estudio de los anillos de crecimiento.

Todos los organismos sufren algún tipo de estrés durante su vida a causa de las perturbaciones ambientales. El estrés conlleva una serie de reacciones con las que el organismo intenta mitigar y reparar los daños. En biología, la capacidad para mantener las funciones vitales durante y después de una perturbación se conoce como resiliencia. Esta viene definida, pues, por la capacidad de resistencia durante la perturbación y el grado de recuperación después de ella.

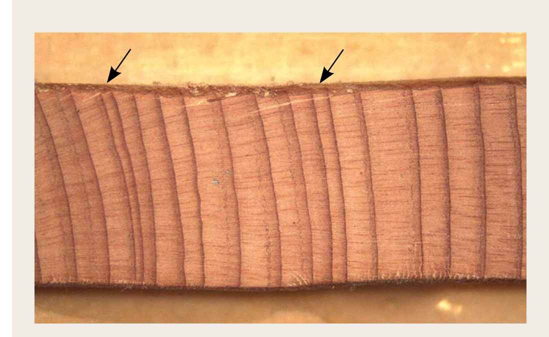
En el contexto actual de cambio climático, se prevé que las sequías serán cada vez más frecuentes y ubicuas y que se convertirán en una de las principales causas de estrés para los seres vivos. Los árboles son particularmente vulnerables a la escasez de agua, puesto que carecen de la capacidad de huir y desplazarse hacia zonas más húmedas. De hecho, en las últimas décadas, la mortalidad y el decaimiento (pérdida de vitalidad) de los bosques asociados a episodios de sequía

extrema han aumentado en muchas regiones del planeta. Resulta crucial, por tanto, conocer la resiliencia que tienen los árboles a esta perturbación.

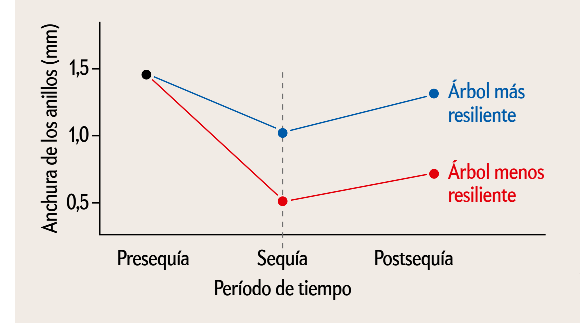
Pero ¿de qué modo puede medirse la resiliencia? En un estudio liderado por nuestro grupo de la Estación Experimental de Zonas Áridas del CSIC, en Almería, y en el que han participado varios equipos nacionales e internacionales, hemos analizado los datos de crecimiento de la madera de diversas especies arbóreas en diferentes regiones del mundo y hemos demostrado la posibilidad de predecir su resiliencia a la sequía. Los resultados de este trabajo los publicamos el pasado enero en *Nature Communications*.

LA RESPUESTA A LA SEQUÍA

EL GROSOR DE LOS ANILLOS DE CRECIMIENTO antes y después de una perturbación nos informa sobre la resiliencia de los árboles y su futuro riesgo de mortalidad.



En la madera de sabina albar (*Juniperus thurifera*) se suceden, de izquierda a derecha, los anillos anuales de crecimiento del tronco: los anillos estrechos (*flechas*) corresponden a la inmediata reacción, o resistencia, ante un episodio de sequía; les siguen anillos más anchos, correspondientes a su recuperación posterior.



El grosor relativo de los anillos antes y después de la sequía permite conocer qué árboles son más resilientes y, por tanto, tienen más posibilidades de sobrevivir en el futuro (*azul*) y cuáles lo son menos y probablemente morirán (*rojo*).

La historia en los anillos

Un gran número de estudios han analizado los mecanismos fisiológicos subyacentes a la mortalidad inducida por la sequía, y han evaluado el riesgo individual de los árboles de sucumbir. Para ello, se han fijado en las razones por las que, dentro de un mismo bosque, algunos mueren y otros sobreviven. Varios factores han resultado claves para la supervivencia. Uno es la resistencia, durante la sequía, de los mecanismos de transporte de agua. Otro es la reserva de carbono que tienen los árboles y la gestión que hacen de ella para la recuperación después de la perturbación. Sin embargo, la medición de estos rasgos suele realizarse en momentos puntuales y conlleva un alto coste en tiempo y dinero. Por consiguiente, no resulta adecuada para predecir la mortalidad a grandes escalas geográficas y no permite evaluar los efectos de las sequías a medio y largo plazo.

La evaluación cuantitativa y global de la relación entre la vulnerabilidad a la sequía y el riesgo de mortalidad de un árbol exige realizar estudios a largo plazo que incluyan una amplia representación de bosques y de especies. Dado que la mayoría de los árboles sufren varios episodios de sequía durante su vida, sería interesante medir los efectos retrospectivos de los períodos áridos en sus rasgos vitales. Ello permitiría deducir su resiliencia y adivinar el riesgo futuro de mortalidad ante nuevas sequías.

Afortunadamente, los árboles guardan en la madera el registro de su crecimiento en forma de anillos que desarrollan anualmente, a partir de los cuales podemos obtener información sobre su resiliencia. Para ello, se compara el grosor del anillo de crecimiento formado en el año de la sequía, normalmente más estrecho, con los de los años anteriores y posteriores. De este modo, los árboles más resilientes deberían presentar una reducción de su crecimiento menos acusada en los años siguientes a la sequía que los árboles menos resilientes.

La idea de relacionar las características de la madera con el riesgo de mortalidad no es nueva. Brian S. Pedersen, de la Universidad Estatal de Oregón, demostró ya en 1998 que algunos robles presentaban un peor crecimiento previo a la muerte asociada a la sequía. Poco después, Kiona Ogle, de la Universidad del Norte de Arizona, dirigió en 2000 otro trabajo que describió que los pinos muertos exhibían una mayor variabilidad en el crecimiento anual de la madera y una mayor vulnerabilidad a la baja disponibilidad de agua que los pinos vivos. Otros estudios también han corroborado esta tendencia a escala local.

Un estudio a gran escala

Ahora, nuestro trabajo ha confirmado esta tendencia a escala mundial: ha demostrado que existe una relación inversa entre la resiliencia a la sequía (medida en el crecimiento de la madera) y el riesgo de mortalidad futura para diferentes especies arbóreas y regiones del planeta.

Para ello hemos utilizado una base de datos mundial publicada en 2017 por un equipo internacional (del que formé parte) dirigido por Jordi Martínez-Vilalta, del Centro de Investigación Ecológica y Aplicaciones Forestales, en Barcelona. Esta base recogía el crecimiento de los anillos de los árboles supervivientes y muertos después de una sequía en 118 bosques, con más de 3500 árboles de 22 especies: 8 frondosas (de hoja ancha) y 14 coníferas (sobre todo pinos).

A pesar de esta diversidad de especies y localidades, el análisis de los datos nos ha permitido verificar la hipótesis de que los árboles que habían muerto durante una sequía se habían mostrado menos resilientes a sequías anteriores, en comparación con los árboles supervivientes de la misma especie y bosque. La importancia del estudio radica en que la resiliencia mostrada en el pasado podría constituirse como un indicador clave para predecir el riesgo de mortalidad de los árboles en el futuro.

Además, nuestros resultados han revelado diferencias entre los dos grandes grupos de especies estudiadas. En las

frondosas (como los robles), una mayor resistencia inmediata al déficit hídrico está relacionada con un menor riesgo de mortalidad; en cambio, en las coníferas, la capacidad de recuperación después de la sequía es importante para reducir la mortalidad. Este resultado reviste importancia, porque pone de manifiesto el vínculo entre el riesgo de mortalidad y las diferencias observadas anteriormente en las estrategias de transporte de agua y gestión del carbono de estos dos grupos. Por ejemplo, los estrechos márgenes de seguridad hidráulica en las frondosas limitan su resistencia inmediata al déficit de agua; en cambio, la menor cantidad de carbohidratos almacenados en las coníferas ralentizan su recuperación tras la perturbación.

Este análisis, aunque incluye una gran variedad de especies arbóreas y de bosques, está limitado por los datos disponibles de mortalidad y de crecimiento de la madera, que clásicamente se centran en los bosques no tropicales, principalmente del hemisferio norte (debido en gran parte a las dificultades metodológicas del estudio en los trópicos). Aun así, los resultados de este trabajo siguen siendo valiosos porque suponen un gran avance de cara a la acuciante necesidad de preservar los bosques frente al cambio climático. El mejor conocimiento de los procesos de mortalidad inducida por la sequía puede ayudar a mejorar las estrategias de gestión forestal.

Lucía de Soto *es investigadora Marie Skłodowska-Curie de la Estación Experimental de Zonas Áridas, del CSIC, en Almería.*

PARA SABER MÁS

The role of stress in the mortality of Midwestern oaks as indicated by growth prior to death. Brian S. Pedersen en *Ecology*, vol. 79, n.º 1, págs. 79-93, enero de 1998.
Tree-ring variation in pinyon predicts likelihood of death following severe drought. K. Ogle, T.G. Whitham, N. S. Cobb en *Ecology*, vol. 81, n.º 11, págs. 3237-3243, noviembre de 2000.
A synthesis of radial growth patterns preceding tree mortality. Maxime Cailleret et al. en *Global Change Biology*, vol. 23, n.º 4, págs. 1675-1690, abril de 2017.
Low growth resilience to drought is related to future mortality risk in trees. Lucía DeSoto et al. en *Nature Communications*, vol. 11, art. 545, enero de 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

Anillos de crecimiento. Marissa Fessenden en *IyC*, julio de 2013.
Fontanería forestal aplicada. Jordi Martínez Vilalta en *IyC*, diciembre de 2013.

BIOMEDICINA

Los minióranos revelan de qué modo el coronavirus hace estragos en el cuerpo

El virus puede dañar los tejidos pulmonar, hepático y renal cultivados en el laboratorio. Ello explicaría algunas complicaciones graves de la COVID-19

SMRITI MALLAPATY

Los investigadores están cultivando en el laboratorio órganos en miniatura para estudiar el modo en que el nuevo coronavirus, SARS-CoV-2, hace estragos en el cuerpo. Los estudios con estos organoides están revelando la versatilidad del virus para propagarse desde los pulmones hasta el hígado, los riñones y los intestinos. Con estos miniórganos también se están explorando los medicamentos que podrían servir para tratar a las personas.

Los médicos saben por los pacientes hospitalizados y las autopsias que el SARS-CoV-2 puede tener un efecto devastador en los órganos. Pero se desconoce si algunos de estos daños son causados directamente por el virus o por complicaciones secundarias de la infección. Varios grupos están realizando estudios con organoides para averiguar por dónde viaja el virus en el cuerpo, qué células infecta y qué daños causa.

«La belleza de los organoides es que simulan la verdadera morfología de los tejidos», afirma Thomas Efferth, biólogo celular de la Universidad Johannes Gutenberg de Maguncia.

Los virólogos suelen estudiar los virus mediante el empleo de líneas celulares o células animales cultivadas en una placa de Petri. Pero estas no resultan muy útiles en la infección por el SARS-CoV-2, según los investigadores, porque no imitan lo que sucede en el cuerpo.

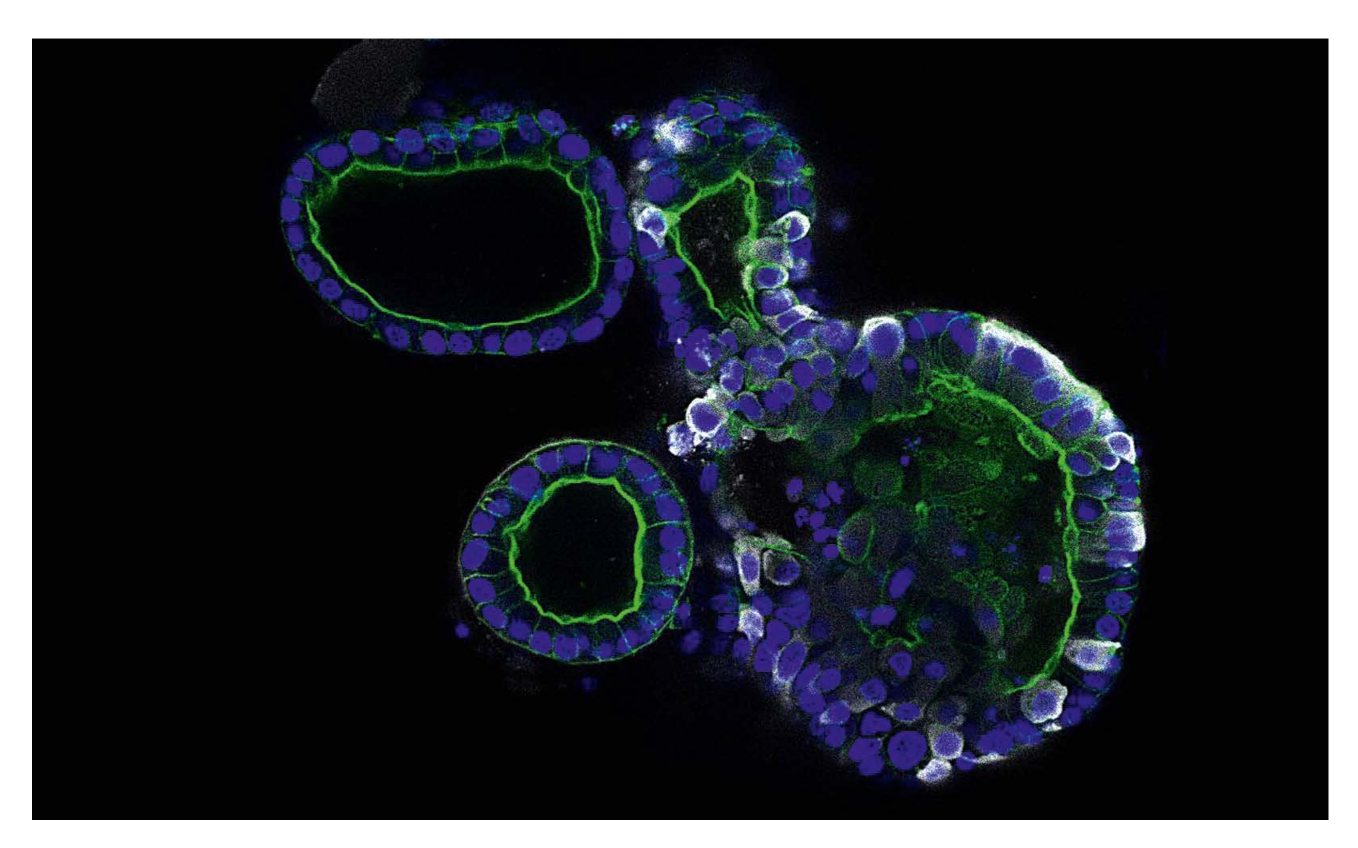
Los organoides sirven mejor para demostrar la acción del coronavirus en los tejidos humanos, explica Núria Montserrat, bióloga de células madre del Instituto de Bioingeniería de Cataluña en Barcelona. Estos pueden cultivarse para que incluyan múltiples tipos de células y adopten la forma del órgano original en semanas, apunta Montserrat. También resultan menos costosos que los modelos animales, y evitan las preocupaciones éticas que estos últimos plantean.

Sin embargo, los estudios sobre los efectos del SARS-CoV-2 en organoides tienen algunas limitaciones, porque no reproducen las interacciones que tienen lugar en el cuerpo entre los órganos. Ello significa que los hallazgos deberán ser validados en modelos animales y estudios clínicos, opina Bart Haagmans, virólogo del Centro Médico Erasmus, en Rotterdam.

En las vías aéreas

Una de las informaciones clave que brindan los organoides es la forma en que actúa el SARS-CoV-2 en las células del sistema respiratorio, desde las vías superiores hasta los pulmones.

Kazuo Takayama, biólogo de células madre de la Universidad de Kioto, y sus colaboradores han desarrollado organoides bronquiales formados por cuatro tipos de células a partir de células congeladas de la capa bronquial externa, o epitelio. Cuando su equipo infectó esos organoides con SARS-CoV-2, descubrió que el virus se dirigía principalmente a las células madre que reponen las células del epitelio, conocidas como células basales, pero no entraron fácilmente en las células exocrinas bronquiolares, o de Clara, con función protectora. El equipo, que publicó su trabajo en *bioRxiv*, se propone estudiar



JOEP BEUMER, INSTITUTO HUBRECHT

ORGANOIDES INTESTINALES HUMANOS, uno de ellos (*derecha*) infectado con el SARS-CoV-2 (*blanco*).

ahora si el virus puede propagarse de las células basales a otras células.

Desde las vías aéreas superiores, el virus puede introducirse en los pulmones y causar insuficiencia respiratoria, una complicación grave de la COVID-19. Mediante organoides de pulmón, Shuibing Chen, biólogo de células madre del Centro Médico Weill Cornell, en Nueva York, ha demostrado que algunas células mueren después de ser infectadas, y que el virus induce la producción de proteínas conocidas como quimiocinas y citocinas, que pueden desencadenar una respuesta inmunitaria exagerada. Numerosas personas con COVID-19 grave experimentan una reacción inmunitaria conocida como tormenta de citocinas que puede resultar mortal.

Pero Chen, que también publicó sus resultados en *bioRxiv*, explica que el motivo de la muerte de las células pulmonares en los pacientes sigue envuelto en el misterio: se desconoce si se debe al propio daño causado por el virus, a una destrucción autoinducida o a que son engullidas por ciertas células inmunitarias. «Sabemos que las células [pulmonares] mueren pero no sabemos cómo», explica Chen, cuyo enfoque para crear organoides fue diferente del de Takayama. En lugar de cultivarlos a partir de células adultas, utilizó células madre pluripotentes, que pueden convertirse en cualquier tipo de célula del cuerpo. Los organoides cultivados de esta manera ofrecen la posibilidad de incluir más tipos de células. No obstante, el resultado final es un tejido menos maduro, por lo que podría no representar el tejido adulto, comenta Chen, que actualmente está cultivando organoides pulmonares con células inmunitarias.

A través de la sangre

Desde los pulmones, el SARS-CoV-2 puede propagarse a otros órganos. Los investigadores no sabían exactamente cómo lograba llegar a ellos hasta que Montserrat y sus colaboradores publicaron un estudio en *Cell* en mayo. En experimentos con organoides, también creados a partir de células madre pluripotentes, demostraron que el coronavirus puede infectar el endotelio (las células que recubren los vasos sanguíneos), lo que le permite filtrarse en la sangre y circular por todo el cuerpo. Los informes anatomopatológicos sobre los vasos sanguíneos de personas con COVID-19 también apoyan esta hipótesis, comenta Josef Penninger, ingeniero genético de la Universidad de la Columbia Británica en Vancouver y coautor principal del estudio.

Las investigaciones con organoides indican que, una vez en la sangre, el virus puede infectar directamente varios órganos, incluido el riñón, explican Penninger y Montserrat. Aunque el virus infectó los organoides renales que cultivaron y algunas de sus células murieron, los investigadores no están seguros de que esta sea la causa directa de la disfunción renal observada en algunos pacientes.

Otro estudio con organoides de hígado descubrió que el virus puede infectar y destruir las células que contribuyen a producir la bilis, conocidas como colangiocitos. Muchos expertos pensaban que el daño hepático observado en personas con COVID-19 está causado por una respuesta inmunitaria hiperactiva o por los efectos secundarios de los medicamentos, comenta Bing Zhao, biólogo celular de la Universidad de Fudan, en Shanghái, que publicó sus resultados en *Protein & Cell*. Su trabajo «indica que el virus ataca directamente al tejido hepático, lo que puede dañar el órgano», añade Zhao.

El virus también puede replicarse en las células que recubren los intestinos delgado y grueso, conocidas como enterocitos, según un estudio de *Science* que utilizó organoides intestinales.

Aunque todos estos hallazgos resultan esclarecedores, el empleo de organoides para estudiar la interacción entre el virus y el hospedador se halla todavía en sus inicios, comenta Haagmans, que desarrolló los organoides intestinales. «Es demasiado pronto para saber hasta qué punto son relevantes», opina. Se necesitan sistemas de organoides más complejos para entender mejor de qué modo el virus interactúa con el sistema inmunitario y daña al organismo.

«Estamos bastante seguros ahora de que el virus que causa la COVID-19 puede infectar otros tejidos más allá de los pulmones y contribuir notablemente a la enfermedad», explica Penninger. Pero las alteraciones más graves, como las que afectan a los riñones y el corazón, probablemente se deban a una combinación de la infección vírica y una respuesta inmunitaria exagerada, opina.

Banco de pruebas de fármacos

Los científicos están explorando también si los organoides pueden utilizarse para modelizar la respuesta del organismo a los fármacos. La esperanza es que sirvan para comprobar la eficacia de posibles tratamientos contra la COVID-19 —algunos de los cuales ya se han empleado de forma precipitada en ensayos clínicos— sin necesidad de realizar pruebas exhaustivas en modelos celulares y animales.

«Debido a la urgencia del tiempo, numerosos ensayos clínicos han sido diseñados en base al conocimiento que se tenía de otros coronavirus y se han emprendido sin hacer antes una evaluación cuidadosa en modelos», apunta Chen. «Como resultado, muchos de ellos han fallado».

Chen examinó unos 1200 medicamentos aprobados por la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos de EE.UU. indicados para otras enfermedades y descubrió que el oncofármaco imatinib suprimía el SARS-CoV-2 en organoides pulmonares. Desde entonces se han iniciado varios ensayos clínicos en humanos para estudiar este tratamiento en la COVID-19.

Otros grupos también están explorando el efecto de fármacos ya existentes contra el coronavirus mediante organoides, con cierto éxito. «Solo sabremos al final de este proceso el valor predictivo de estos sistemas para conocer la eficacia de los medicamentos», afirma Haagmans. «Se trata de un proceso a largo plazo.»

Smriti Mallapaty, periodista científica especializada en tecnología y agricultura, es editora sénior de *Nature*.

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 583, págs. 15-16, 2020. Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2020

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

Identification of candidate COVID-19 therapeutics using hPSC-derived lung organoids. Yuling Han et al., prepublicado en *bioRxiv*, mayo de 2020.
Inhibition of SARS-CoV-2 infections in engineered human tissues using clinical-grade soluble human ACE2. Vanessa Monteil en *Cell*, vol. 181, págs.905-913, mayo de 2020.
SARS-CoV-2 productively infects human gut enterocytes. Mart M. Lamers et al. en *Science*, vol. 369, n.º 6499, págs. 50-54, julio de 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

Organoides: los constructores del cuerpo. Michael Eisenstein en *IyC*, abril de 2018.
Medicamentos por la vía rápida. Michael Waldholz en *IyC*, junio de 2020.
Dentro del nuevo coronavirus. Mark Fischetti en *IyC*, julio de 2020.

FÍSICA DE PARTÍCULAS

¿Por qué hay materia en el universo?

El experimento japonés T2K halla indicios de una diferencia clave en el comportamiento de neutrinos y antineutrinos. En caso de confirmarse, el resultado podría explicar por qué la materia dominó sobre la antimateria en el origen del cosmos

SILVIA PASCOLI Y JESSICA TURNER

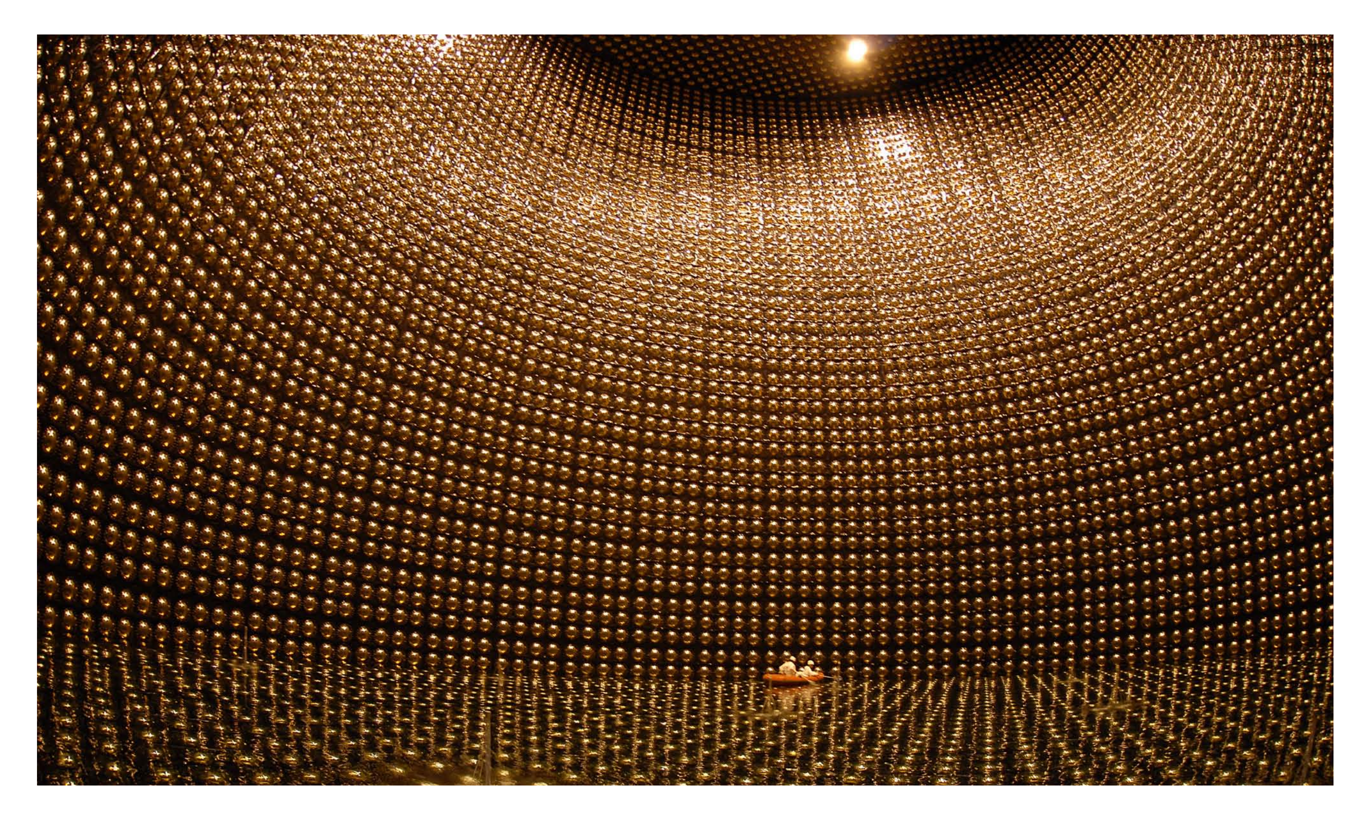
Toda la materia visible del universo se compone en última instancia de partículas elementales. De ellas, las conocidas como fermiones se clasifican a su vez en dos tipos: quarks (que dan lugar a partículas compuestas, como el protón o el neutrón) y leptones. Estos últimos comprenden el electrón, el muon, la partícula tau y los neutrinos.

Por cada tipo de partícula elemental existe una antipartícula con las mismas propiedades pero de carga opuesta. El ejemplo más conocido tal vez sea el del positrón, la antipartícula del electrón. Durante mucho tiempo se pensó que, en un «mundo especular» hecho de antimateria, las antipartículas deberían comportarse de la misma manera que sus homólogas de materia. Sin embargo, desde los años sesenta sabemos que los quarks y los antiquarks no respetan dicha simetría. Ahora, un trabajo publicado en *Nature* por la colaboración internacional T2K ha referido indicios de que la misma violación de simetría podría darse también en los leptones: un resultado largamente buscado y que afecta de manera profunda a nuestra comprensión de las leyes físicas fundamentales y la evolución del universo.

La mencionada simetría entre partículas y antipartículas se conoce con el nombre técnico de «simetría de paridad y conjugación de carga» (CP). La transformación asociada combina el intercambio de cada partícula por su correspondiente antipartícula, así como la reflexión especular de su posición y su movimiento. En otras palabras: si se respetara la simetría CP, las leyes que gobernarían un «universo especular» hecho de antimateria deberían ser idénticas a las leyes físicas que conocemos. Pero ¿por qué se rompe la simetría CP? ¿Cuáles son las consecuencias de dicha ruptura?

Universo asimétrico

En 1967, el físico Andréi Sájarov propuso que la violación de la simetría CP era uno



INTERIOR del detector subterráneo de neutrinos Super-Kamiokande, en Japón.

EXPERIMENTO T2K, HTTP://T2K-EXPERIMENT.ORG

de los requisitos clave para explicar por qué nuestro universo parece tener una pequeña preferencia por la materia frente a la antimateria. Dicho desequilibrio, cuantificado en unas pocas partículas por cada 10.000 millones de fotones, es en última instancia el responsable de la existencia de los planetas, las estrellas y de nosotros mismos. Si el universo hubiera comenzado con cantidades exactamente iguales de partículas y antipartículas, unas y otras se habrían aniquilado poco después de la gran explosión y hoy el cosmos solo contendría fotones.

¿Cómo surgió ese pequeño exceso de materia en los primeros instantes del universo? Aunque sabemos que los quarks no respetan la simetría CP, dicha violación es demasiado pequeña para haber generado toda la materia que vemos hoy a nuestro alrededor. Por esa razón, hace tiempo que los físicos estudian la posible violación de la simetría CP en el sector leptónico. Según algunos de los modelos que se han postulado para explicar la masa de los neutrinos, estos tendrían asociados ciertos compañeros muy masivos aún por descubrir. Estos habrían abundado en el universo primitivo y, poco después, se habrían desintegrado. En caso de violarse la simetría CP en este sector, tales desintegraciones podrían haber generado el desequilibrio observado entre materia y antimateria.

El descubrimiento de una violación sustancial de la simetría CP en el sector leptónico sería, por tanto, revolucionario. Si esta se viera acompañada de una violación del «número leptónico» (esto es, si se demostrase que el número de leptones menos el de antileptones no se conserva en los procesos físicos), el hallazgo proporcionaría una sólida prueba circunstancial sobre el origen de la asimetría entre la materia y la antimateria.

Partículas mutantes

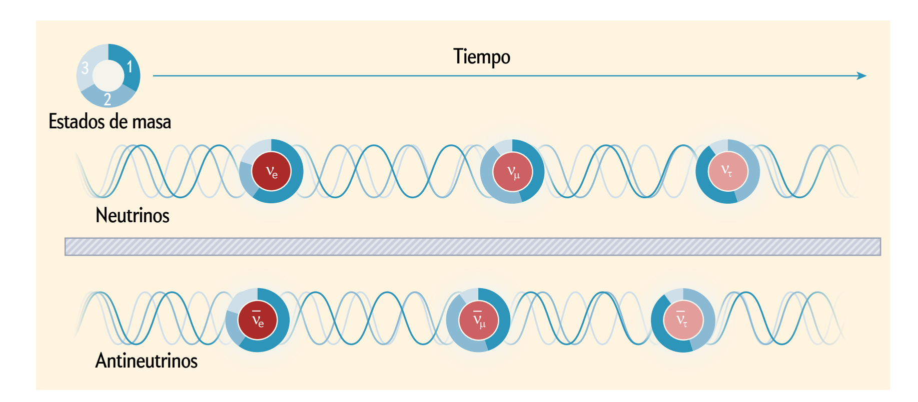
La violación de la simetría CP en el sector leptónico es esquiva, pero puede buscarse estudiando el comportamiento de los neutrinos. Estas partículas elementales, las más enigmáticas del modelo estándar, son notoriamente reacias a interaccionar con la materia ordinaria, por lo que resultan muy difíciles de detectar. Sin embargo, son ubicuas: en un instante dado, una taza de café se ve atravesada por unos 100.000 neutrinos «fríos» que permean el universo, así como por un número muchas veces mayor de neutrinos procedentes del Sol.

Existen tres tipos de neutrinos, cada uno de ellos asociado a uno de los leptones con carga eléctrica que conocemos: el electrón, el muon y la partícula tau. Durante décadas se pensó que la masa de los neutrinos era exactamente nula. No obstante, en 1998 el experimento japonés Super-Kamiokande y el Observatorio de Neutrinos de Sudbury hallaron que, en realidad, estas partículas sí que tienen una pequeña masa.

Por otro lado, los neutrinos de un tipo pueden transmutarse espontáneamente en neutrinos de otro. Este curioso efecto cuántico, conocido como «oscilación», tiene su origen en el hecho de que cada tipo de neutrino es en realidad una «mezcla» (una superposición cuántica) de tres estados, cada uno de los cuales tiene asociada una masa diferente. Un aspecto importante es que dicho estado de superposición cuántica puede cambiar con el tiempo, ya que cada una de sus componentes evoluciona de manera distinta. Como consecuencia, un neutrino que fue generado como neutrino muónico puede cambiar y acabar convertido en un neutrino de tipo electrónico.

El experimento T2K

En las dos últimas décadas han sido varios los experimentos que han estudiado las oscilaciones de neutrinos. Hasta hace pocos años, sin embargo, no se habían detectado oscilaciones de neutrinos muónicos en



NEUTRINOS A TRAVÉS DEL ESPEJO: Cada uno de los tres tipos de neutrinos conocidos (el electrónico, el muónico y el tauónico; ν_e, ν_μ y ν_τ) corresponde en realidad a una superposición cuántica de tres estados de masas diferentes (*tonos azules; las ondas constituyen representaciones simplificadas de cómo contribuye cada estado de masa a cada tipo de neutrino*). Dado que cada uno de esos estados de masa evoluciona de manera distinta en el tiempo, los neutrinos de una clase pueden transmutarse espontáneamente en neutrinos de otra. Un resultado obtenido recientemente en el experimento T2K, en Japón, sugiere que los neutrinos (*arriba*) se transformarían a un ritmo distinto que los antineutrinos (*abajo*). Esa diferencia podría explicar por qué en el origen del universo se creó más materia que antimateria.

neutrinos electrónicos. La probabilidad de que se produzca dicha transformación es pequeña, pero en ella se esconde la clave para estudiar la posible violación de la simetría CP en el sector leptónico. Si esta simetría se conserva, la probabilidad de que un neutrino muónico se convierta en uno electrónico debería ser idéntica a la del proceso análogo con antineutrinos. Gracias al estudio de tales oscilaciones con una precisión sin precedentes, la colaboración T2K ha obtenido ahora los primeros indicios de que tal vez eso no se cumpla.

En el experimento T2K se genera un haz de neutrinos en el Complejo de Investigación para la Aceleración de Protones de Japón (J-PARC), en la localidad de Tokai, donde un haz de protones muy energéticos se hace chocar contra un blanco de grafito. Ello produce enormes cantidades de partículas conocidas como piones y kaones, las cuales se desintegran acto seguido en neutrinos (o en antineutrinos, dependiendo de las condiciones del experimento).

La mayoría de esos neutrinos atravesarán la Tierra sin detenerse. Pero algunos de ellos serán interceptados por los detectores subterráneos del experimento Super-Kamiokande, alojado en las entrañas del monte Ikeno, a 295 kilómetros de distancia. Este complejo consta de 50.000 toneladas de agua ultrapura rodeada por un vasto conjunto de fotodetectores. Cuando un neutrino interacciona con uno de los neutrones presentes en el agua, puede generar un muon o un electrón, dependiendo de qué tipo de neutrino haya tomado parte en la reacción. El experimento T2K puede determinar si la partícula producida era un muon o un electrón e inferir así el tipo de neutrino que llegó al detector. Como consecuencia, y a partir de los datos del haz de partida, es posible medir la probabilidad de oscilación de neutrinos muónicos en electrónicos.

Indicios prometedores

La colaboración T2K ha analizado los datos recopilados entre 2009 y 2018 tanto para neutrinos como para antineutrinos. Al combinarlos con los procedentes de otros experimentos, los investigadores han obtenido indicios de violación de la simetría CP con un nivel de confianza del 95 por ciento, así como pruebas de que el parámetro de violación de CP probablemente sea grande. Tales resultados podrían constituir los primeros indicios del origen de la asimetría entre materia y antimateria en nuestro universo.

Con todo, las afirmaciones extraordinarias requieren pruebas extraordinarias. En física de partículas ello exige alcanzar un nivel de confianza del 99,9999 por ciento, considerablemente mayor que el logrado ahora. Para obtenerlo será necesario medir con mayor precisión las probabilidades de oscilación de los neutrinos, lo que requerirá emplear haces más intensos, detectores mayores y comprender mejor el proceso experimental.

La próxima generación de experimentos se prepara para acometer ese reto. El proyecto T2HK, también en Japón, empleará la misma técnica que T2K pero usará el detector Hiper-Kamiokande, el cual contará con una cantidad de agua diez veces mayor que su predecesor y un haz más intenso. Hiper-Kamiokande fue aprobado el pasado mes de febrero y su construcción comenzará en breve. Por su parte, el Experimento de Neutrinos del Subsuelo Profundo (DUNE), en EE.UU., publicó su informe técnico también en febrero. Con base en Dakota del Sur y una técnica de detección basada en cuatro módulos con miles de toneladas de argón líquido, detectará los neutrinos generados en el laboratorio Fermilab, a 1300 kilómetros de distancia. Varios prototipos menores ya probados en el CERN han demostrado la viabilidad de DUNE. Con técnicas y mediciones complementarias, cabe esperar que, de aquí a 15 años, T2HK y DUNE proporcionen una respuesta definitiva al enigma de la violación de la simetría CP en el sector leptónico.

Silvia Pascoli *investiga en el Instituto de Fenomenología de Física de Partículas de la Universidad de Durham.* ***Jessica Turner*** *trabaja en el Departamento de Física Teórica del Fermilab, en Illinois.*

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 580, págs. 323-324, 2020. Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2020

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

Violation of *CP* invariance, *C* asymmetry, and baryon asymmetry of the universe. Andréi Sájarov en *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters*, vol. 5, págs. 24-27, 1967.

Observation of electron neutrino appearance in a muon neutrino beam. Colaboración T2K en *Physical Review Letters*, vol. 112, artículo n.º 061802, febrero de 2014.

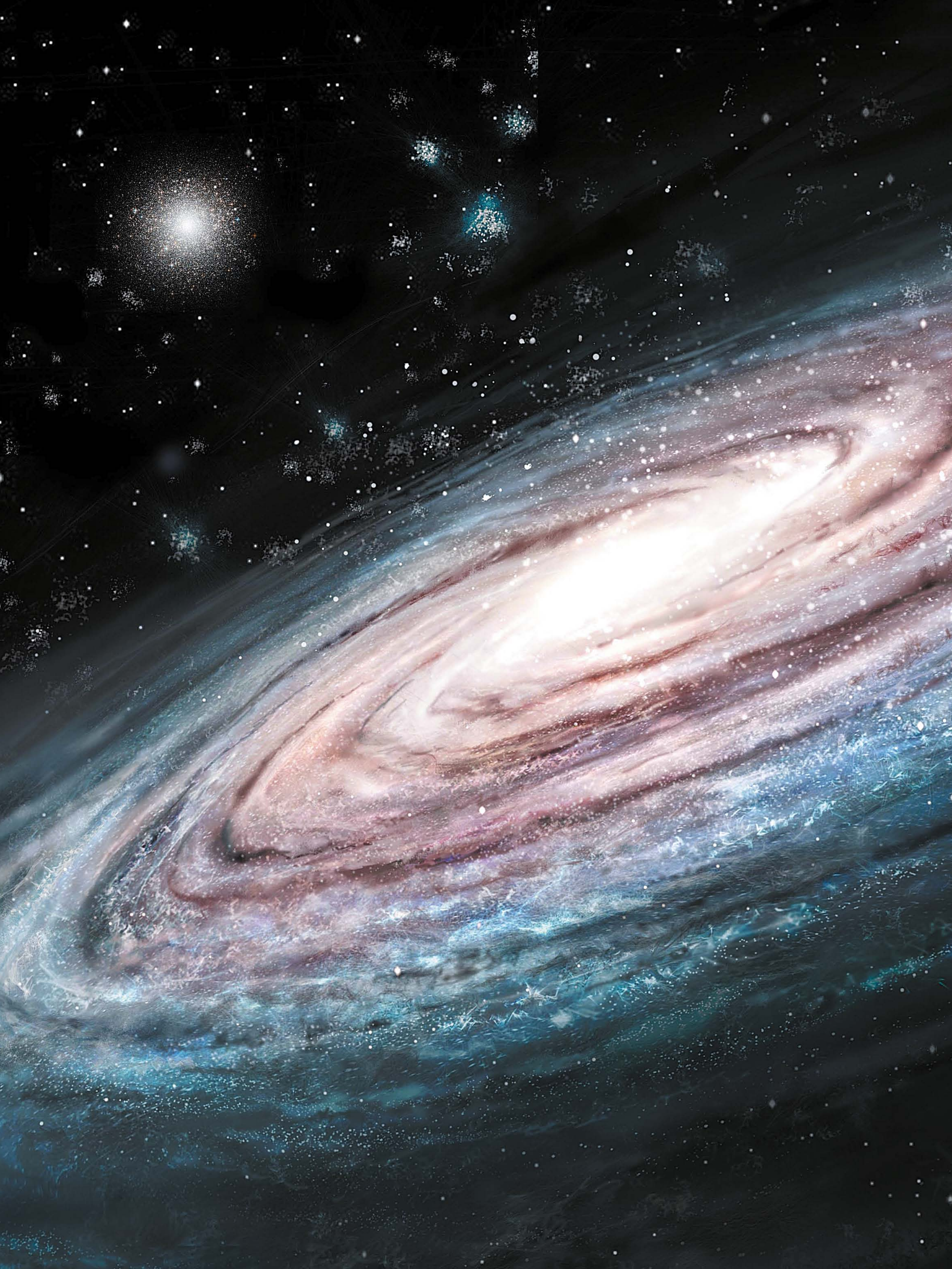
Constraint on the matter–antimatter symmetry-violating phase in neutrino oscillations. Colaboración T2K en *Nature*, vol. 580, págs. 339-344, abril de 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

El origen de la materia. James M. Cline en *IyC*, junio de 2005.

Mensajeros fantasmales de nueva física. Martin S. Hirsch, Heinrich Päs y Werner Porod en *IyC*, junio de 2013.

El enigma de los neutrinos. Clara Moskowitz en *IyC*, diciembre de 2017.



ASTRONOMÍA

UNA NUEVA VISIÓN DE LA VÍA LÁCTEA

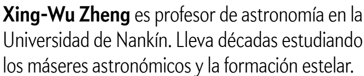
Los recientes esfuerzos por cartografiar la estructura espiral de la galaxia nos brindan una imagen sin precedentes de nuestro hogar cósmico

Mark J. Reid y Xing-Wu Zheng

Ilustración de Ron Miller

Mark J. Reid es radioastrónomo en el Centro Smithsoniano de Astrofísica de Harvard. En 2019 fue elegido miembro de la Academia Nacional de Ciencias de Estados Unidos.

Xing-Wu Zheng es profesor de astronomía en la Universidad de Nankín. Lleva décadas estudiando los máseres astronómicos y la formación estelar.





Hace cientos de años, los exploradores surcaban los océanos y atravesaban continentes desconocidos para cartografiar el planeta, y en el último medio siglo, las sondas espaciales han fotografiado gran parte del sistema solar. Sin embargo, aunque hemos llegado a conocer muy bien nuestro patio trasero astronómico, solo tenemos una imagen difusa del vecindario, la Vía Láctea. La razón es obvia: no podemos salir fuera a echar un vistazo. Enviar una nave espacial más allá de nuestra galaxia para que, tras un viaje de muchos millones de años, mire hacia atrás y tome una instantánea es claramente irrealizable. Quedan numerosas incógnitas por despejar sobre nuestro hogar cósmico, como cuántos brazos espirales tiene la Vía Láctea, si la gran estructura más cercana al Sol constituye uno de ellos o en qué lugar de la galaxia se encuentra el sistema solar.

Pero hace poco hemos empezado a cartografiar la Vía Láctea desde dentro, lo que nos permite componer por vez primera una imagen precisa de su estructura. Esta vista es fruto de varios proyectos de gran envergadura con modernos telescopios ópticos y radiotelescopios, incluido el nuestro, el Sondeo de la Estructura Espiral Barrada (BeSSeL). Para llevarlo a cabo, obtuvimos un tiempo de observación sin precedentes (5000 horas) con la Red de Muy Larga Base (VLBA), operada por el Observatorio Nacional de Radioastronomía de Estados Unidos.

Nuestros primeros resultados ofrecen una visión nueva y mejorada de la Vía Láctea. Además de comprender mejor qué aspecto tiene, estamos comenzando a esclarecer por qué las galaxias como la nuestra presentan una estructura espiral y cómo encaja nuestro hogar astronómico en el conjunto del universo [*véase* «Nuestro lugar en el cosmos», por Noam I. Libeskind y R. Brent Tully; Investigación y Ciencia, septiembre de 2016].

NUESTRO VECINDARIO CÓSMICO

A comienzos del siglo xix, William Parsons, tercer conde de Rosse, construyó un telescopio de 180 centímetros, un instrumento enorme para su época. Con él observó y dibujó lo que hoy llamamos la galaxia del Remolino, que mostraba una clara estructura espiral. Sin embargo, sin saber a qué distancia se encontraba ni cuáles eran las dimensiones de la Vía Láctea, no quedaba claro si se trataba de una pequeña estructura contenida en nuestra galaxia o de una gran nebulosa similar a ella. El debate se prolongó hasta bien entrado el siglo xx, cuando Edwin Hubble (usando una técnica desarrollada por Henrietta Leavitt para medir distancias a estrellas brillantes) demostró que la galaxia del Remolino y otras galaxias espirales similares se hallaban muy lejos de la nuestra. El hallazgo refutó la idea de que la Vía Láctea podía englobar todo el universo.

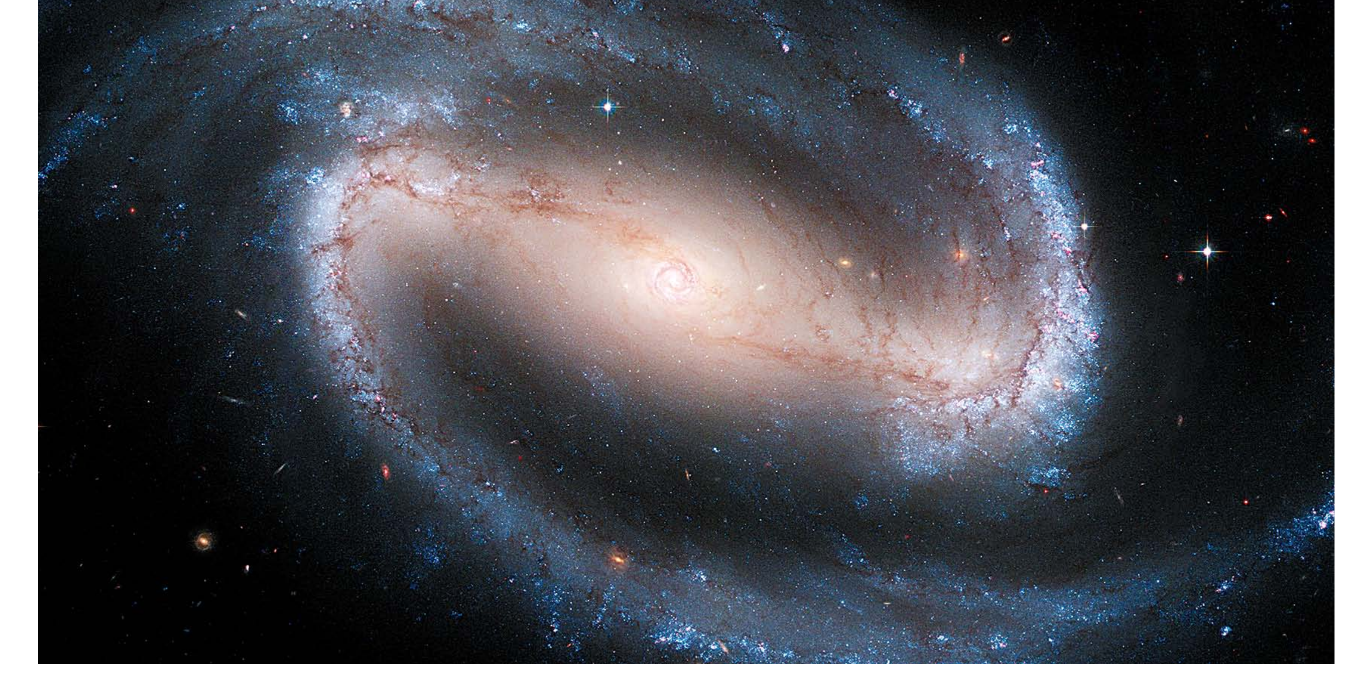
Los astrónomos dedujeron que vivimos en una galaxia espiral midiendo los movimientos del gas a través del disco (la gran región aplanada que conforma la parte principal de la Vía Láctea). Las galaxias espirales son muy comunes, y dos ejemplos cercanos, NGC 1300 y Messier 101 (M101), nos dan una idea del aspecto que podría tener la Vía Láctea. En el centro de NGC 1300 se observa una «barra»: una brillante estructura lineal, de cuyos extremos nacen dos brazos espirales azulados que van extendiéndose hacia el exterior a medida que la envuelven. Las barras se observan en la mayoría de las galaxias espirales, y se cree que se forman a partir de inestabilidades gravitatorias en el denso disco galáctico. A su vez, la rotación de la barra central puede originar los brazos espirales. (Otros procesos, como las inestabilidades asociadas a grandes concentraciones de masa en el interior del disco o las perturbaciones gravitatorias causadas por galaxias cercanas, también pueden generar brazos.) Estos suelen brillar con luz azul, procedente de enormes semilleros estelares donde se forman estrellas masivas. Por su parte, M101, conocida como la galaxia del Molinete, carece de la barra brillante de NGC 1300, pero posee más brazos espirales.

EN SÍNTESIS

Los astrónomos saben sorprendentemente poco sobre la estructura de la Vía Láctea. Por ejemplo, desconocen cuántos brazos espirales tiene o cuál es la ubicación precisa del Sol.

Pero los científicos acaban de componer el mejor mapa de la galaxia producido hasta la fecha, gracias a varios proyectos recientes que emplean la interferometría de muy larga base.

El mapa revela que nuestra galaxia posee al menos cuatro grandes brazos espirales y otras estructuras menores, y que el Sol se sitúa casi en el plano central del disco galáctico.



LA GALAXIA CERCANA NGC 1300 es una espiral barrada con un diámetro de más de 100.000 años luz, igual que la Vía Láctea, aunque no es su viva imagen: según los estudios, nuestra galaxia posee cuatro grandes brazos espirales en vez de dos.

NASA, ESA Y HUBBLE HERITAGE TEAM (STSCI/AURA)

Los astrónomos piensan desde hace tiempo que la Vía Láctea comparte características con ambas galaxias: es probable que tenga una gran barra similar a la de NGC 1300 y varios brazos espirales como los de M101. Más allá de estos aspectos básicos, no existe consenso. Las observaciones infrarrojas realizadas hace más de un decenio con el telescopio espacial Spitzer sugieren que nuestra galaxia posee solo dos brazos espirales. Pero las observaciones en longitudes de onda de radio del hidrógeno atómico y el monóxido de carbono concentrados en los brazos espirales de otras galaxias indican que tiene cuatro. Los astrónomos también han debatido sobre la distancia del Sol al centro de la Vía Láctea y su elevación por encima del plano central del disco galáctico.

Hace casi setenta años, los científicos calcularon la distancia a algunas estrellas azules luminosas y próximas. Al situarlas en un mapa, revelaron segmentos de tres brazos espirales cercanos: el de Sagitario, el local (o de Orión) y el de Perseo. Por esa misma época, los radioastrónomos observaron el gas de hidrógeno atómico, que emite una radiación característica con una longitud de onda de 21 centímetros. Cuando ese gas se mueve respecto a la Tierra, la frecuencia de su radiación varía debido al efecto Doppler; eso permite calcular la velocidad del gas, que da indicios sobre su posición en la galaxia.

Los cartógrafos galácticos usan cierto sistema de coordenadas para describir la Vía Láctea vista desde el Sol: por analogía con la longitud y latitud terrestres, la longitud galáctica (*l*) es cero en la dirección del centro galáctico y aumenta a lo largo del plano «ecuatorial» de la Vía Láctea (visto desde el hemisferio norte), mientras que la latitud galáctica (*b*) indica el ángulo formado con dicho plano. Los diagramas de la velocidad frente a la longitud galáctica para la radiación de 21 centímetros proveniente del gas de hidrógeno (y, más tarde, para el monóxido de carbono) revelaron arcos de emisión continuos que parecían perfilar brazos espirales. No obstante, este método cartográfico adolece de muchas ambigüedades y no ofrece la precisión necesaria para evidenciar la estructura espiral de la galaxia.

UNA NUEVA VISIÓN

Uno de los motivos por los que sabemos tan poco sobre la Vía Láctea es que contiene una enorme cantidad de polvo, el cual absorbe la luz visible de manera eficaz y bloquea nuestra visión a través del disco, de modo que en la mayoría de direcciones no podemos ver demasiado lejos. Otra razón es la inmensidad de la Vía Láctea: la luz de las estrellas situadas en el otro extremo de la galaxia tarda más de 50.000 años en alcanzar la Tierra, y esas distancias dificultan incluso determinar qué estrellas están más cerca y cuáles más alejadas.

Gracias a los nuevos telescopios que operan en longitudes de onda ópticas desde el espacio y en longitudes de onda de radio desde la superficie de la Tierra, estamos haciendo grandes progresos para responder nuestras preguntas sobre la Vía Láctea. La misión Gaia, lanzada en 2013 con el objetivo de calcular las distancias a más de mil millones de estrellas de nuestra galaxia, sin duda revolucionará nuestra concepción de las distintas poblaciones estelares que participaron en la formación de la Vía Láctea. Sin embargo, Gaia no puede explorar libremente los brazos espirales distantes porque emplea luz visible, la cual es absorbida por los granos de polvo interestelar. En cambio, las ondas de radio atraviesan el polvo sin problemas y nos permiten examinar todo el disco y cartografiar su estructura.

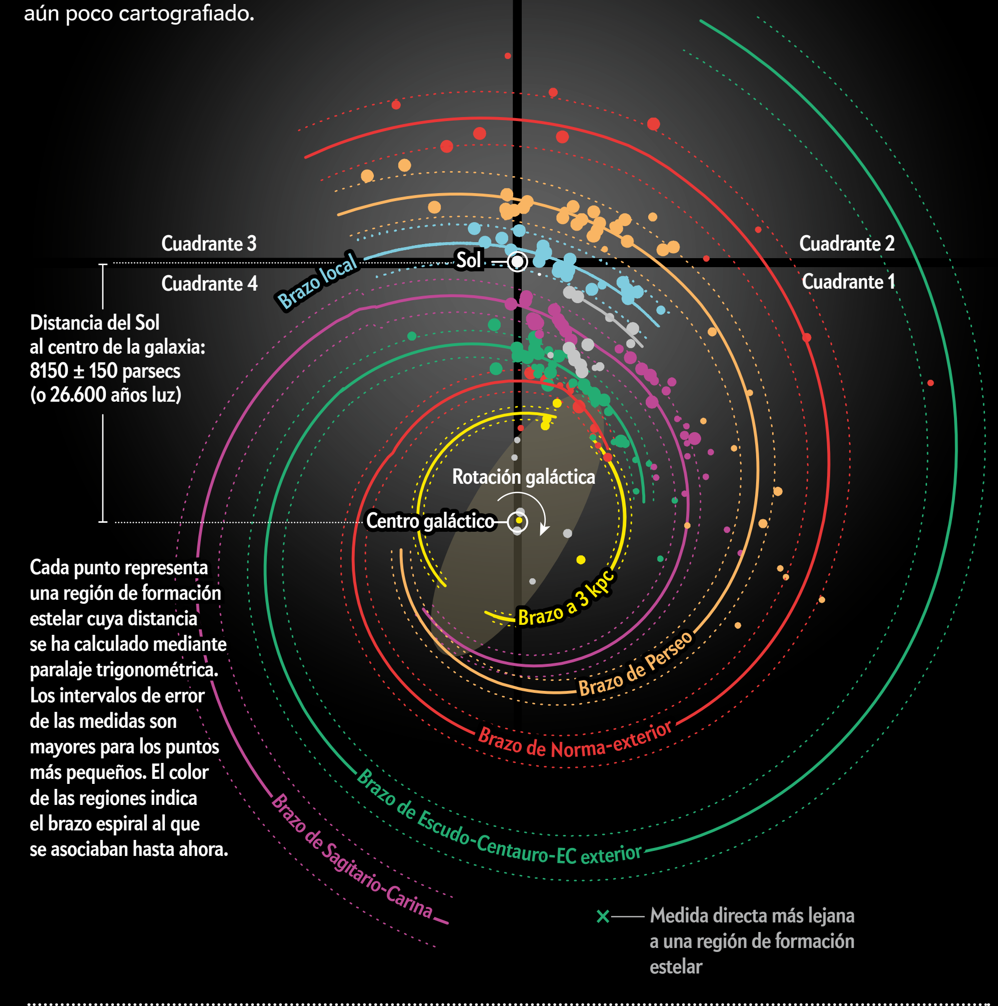
Dos grandes proyectos estudian la Vía Láctea por medio de una técnica radioastronómica llamada interferometría de muy larga base (VLBI, por sus siglas en inglés). La colaboración VERA (Exploración de Radioastrometría con VLBI) usa cuatro radiotelescopios repartidos por la geografía japonesa, desde el norte del país (Mizusawa) hasta las islas más meridionales (Ishigaki) y orientales (Ogasawara). Por su parte, el proyecto BeSSeL emplea la VLBA, un conjunto de diez telescopios que cubre gran parte del hemisferio occidental, desde Hawái hasta Nueva Inglaterra y Santa Cruz, en las islas Vírgenes de EE.UU.

Dado que la distancia entre sus telescopios es comparable al diámetro de la Tierra, la resolución angular de estas redes supera con creces la de cualquier otro telescopio actual (de cualquier longitud de onda). Los investigadores deben observar simultáneamente con todos los telescopios y sincronizar los datos almacenados en los discos duros locales con los mejores relojes atómicos. Luego envían esos datos a un ordenador especial, que realiza una correlación cruzada entre las señales de los distintos telescopios. Tras algunas calibraciones, se obtiene una imagen digital de lo que veríamos si nuestros ojos fueran sensibles a

Continúa en la página 28

Un remolino de estrellas

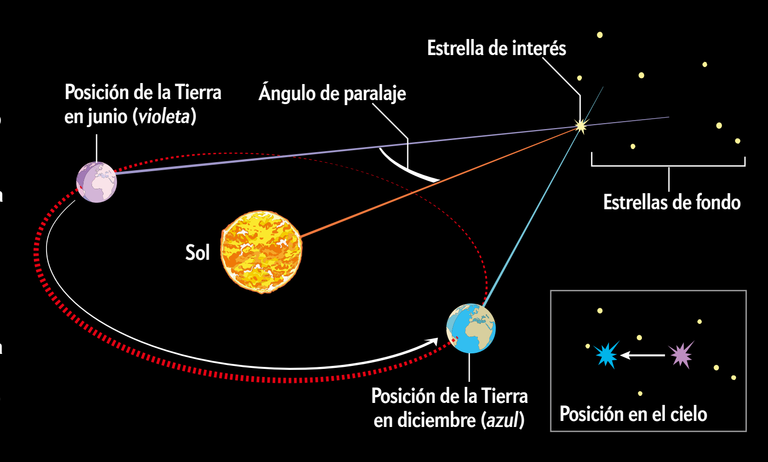
Las distancias calculadas a partir de miles de horas de observación con radiotelescopios (*abajo*) han dado lugar a la mejor panorámica de la estructura de la Vía Láctea jamás producida (*derecha*). Los datos revelan la presencia de cuatro grandes brazos espirales en torno a una «barra» central de estrellas. El Sol (que los astrónomos ubican en el origen de un sistema de referencia dividido en cuadrantes) está cerca de un fragmento de brazo espiral más pequeño (*azul*) y describe una órbita de 212 millones de años alrededor del centro galáctico. Los futuros estudios con radiotelescopios situados en el hemisferio sur de la Tierra podrían desvelar más estructuras en el cuarto cuadrante, aún poco cartografiado.



Cada punto representa una región de formación estelar cuya distancia se ha calculado mediante paralaje trigonométrica. Los intervalos de error de las medidas son mayores para los puntos más pequeños. El color de las regiones indica el brazo espiral al que se asociaban hasta ahora.

PARALAJE TRIGONOMÉTRICA

Para medir la distancia a una estrella, los astrónomos usan el desplazamiento de su posición, o ángulo de paralaje, al mirarla desde puntos opuestos de la órbita terrestre. Conociendo esta paralaje (que es mayor para los astros cercanos) y la separación entre la Tierra y el Sol, podemos hallar a qué distancia de nuestro planeta se encuentra la estrella a través de un sencillo cálculo trigonométrico.





XING-WU ZHENG Y MARK J. REID, BESSEL (SONDEO DE LA ESTRUCTURA ESPIRAL BARRADA, UN PROYECTO CIENTÍFICO CLAVE DEL VLBA), UNIVERSIDAD DE NANKÍN Y CENTRO SMITHSONIANO DE ASTROFÍSICA DE HARVARD (*gráfico e ilustración de la Vía Láctea*); ELENA HARTLEY (*gráfico de la paralaje*)

Viene de la página 25
las ondas de radio y estuvieran separados casi por el ancho del planeta. Tales imágenes presentan una increíble resolución angular, superior a 0,001 segundos de arco (en un grado hay 3600 segundos de arco y la esfera celeste tiene 360 grados). En comparación, el ojo humano puede llegar a resolver estructuras separadas por unos 40 segundos de arco, e incluso el telescopio espacial Hubble alcanza solo unos 0,04 segundos de arco.

Mediante la VLBI podemos determinar la posición de una estrella que brilla en frecuencias de radio respecto a los cuásares de fondo (agujeros negros activos y brillantes situados en el centro de galaxias lejanas) con una precisión de casi 0,00001 segundos de arco. Eso nos permite estimar distancias muy grandes a partir de la paralaje: el hecho de que un objeto cercano perfilado contra un fondo distante aparece en diferentes posiciones cuando lo observamos desde distintos puntos de vista. Podemos simular este efecto si estiramos el brazo y nos miramos el pulgar, cerrando alternativamente el ojo izquierdo y el derecho. Como nuestros ojos están separados por varios centímetros, la posición del pulgar parecerá moverse un ángulo de unos seis grados al observarlo con un ojo y luego con el otro. Si medimos este desplazamiento angular y conocemos la separación entre los puntos de vista, es fácil calcular la distancia al objeto.

Lo ideal para cartografiar la estructura espiral es observar estrellas masivas jóvenes. Estos astros de vida corta a menudo se asocian con intensos episodios de formación estelar en los brazos espirales, y están tan calientes que ionizan el gas circundante, haciendo que brille con luz azul y creando así faros cósmicos que ayudan a localizar los brazos. Sin embargo, como estamos atrapados en el disco polvoriento de la Vía Láctea, no podemos distinguir bien estas estrellas en nuestra propia galaxia. Por suerte, en el exterior de las regiones que ionizan hay moléculas de agua y metanol que constituyen fuentes de radio muy brillantes, pues emiten una señal máser (acrónimo de «amplificación de microondas por emisión estimulada de radiación») que el polvo galáctico apenas atenúa. Está emisión es análoga a la luz óptica de un láser pero en frecuencias de radio, y en contextos astrofísicos proviene de nubes de gas del tamaño del sistema solar y con una masa similar a la de Júpiter [*véase* «Máseres cósmicos», por Dale F. Dickinson; Investigación y Ciencia, agosto de 1978]. Lo que vemos en las imágenes de radio son puntos muy brillantes, propicios para hacer mediciones de paralaje.

INTERFEROMETRÍA DE MUY LARGA BASE

Máxima resolución

Medir el minúsculo ángulo de paralaje de las regiones de formación estelar situadas en la otra punta de la galaxia exige una gran resolución angular. Para alcanzarla, es preciso combinar las observaciones simultáneas de diversos radiotelescopios de todo el mundo. Aquí se ilustran las posibilidades de esta técnica, llamada interferometría de muy larga base (VLBI), que ofrece una resolución unas 40 veces superior a la de las imágenes más nítidas del telescopio Hubble.



ELENA HARTLEY

IMAGEN ACTUALIZADA

A partir de estas paralajes, los proyectos BeSSeL y VERA han medido la distancia a unas 200 estrellas jóvenes y calientes de la Vía Láctea. Los datos abarcan aproximadamente un tercio de la galaxia y revelan la existencia de cuatro brazos que se extienden de manera continua a lo largo de grandes distancias.

El mapa resultante también muestra que el Sol se encuentra muy cerca de una quinta estructura, el llamado brazo local. Los astrónomos solían referirse a él como espuela local (o de Orión) porque pensaban que se trataba de una estructura menor, similar a los pequeños apéndices observados en los brazos espirales de otras galaxias. Pero esta interpretación probablemente es errónea: según nuestros datos, parece un segmento aislado de un brazo espiral, que envuelve menos de una cuarta parte de la Vía Láctea. No obstante, presenta una formación de estrellas masivas comparable a la observada en un tramo de longitud similar del cercano brazo de Perseo, que algunos astrónomos han considerado uno de los dos brazos

dominantes de la Vía Láctea (el otro es el de Escudo-Centauro-ECE, donde «ECE» denota «Escudo-Centauro exterior»). Sin embargo, hemos hallado que la formación de estrellas masivas en el brazo de Perseo disminuye sensiblemente conforme se enrosca hacia el interior desde el Sol, por lo que a un observador externo no le parecería un brazo muy prominente.

Si usamos las posiciones tridimensionales de nuestras estrellas jóvenes masivas y modelizamos los movimientos medidos, podemos estimar algunos parámetros fundamentales de la Vía Láctea. Hemos calculado que el Sol se encuentra a 8150 ± 150 parsecs (26.600 años luz) del centro de la galaxia, un valor inferior a los 8500 parsecs que recomendaba hace décadas la Unión Astronómica Internacional. También hemos hallado que la Vía Láctea gira a 236 kilómetros por segundo, unas ocho veces más deprisa que la Tierra en su órbita alrededor del Sol. Estos dos datos implican que el Sol completa una vuelta en torno al centro galáctico cada 212 millones de años; es decir, que los dinosaurios aún deambulaban por la Tierra la última vez que el sistema solar pasó por esta zona de la Vía Láctea.

La parte de la galaxia más interna que el Sol es muy delgada y prácticamente plana. Aunque esto se sabe desde hace tiempo, la ubicación del nuestra estrella respecto a ese plano ha seguido generando debate. Hace poco, los astrónomos fijaron un valor de 25 parsecs (82 años luz) sobre el plano, pero nuestros resultados se alejan notablemente de esa estimación. Al considerar las posiciones de las estrellas masivas cuyas distancias conocemos con precisión y ajustarlas a un plano, determinamos que el Sol está tan solo 6 parsecs (20 años luz) por encima de este, lo que representa el 0,07 por ciento de la separación entre el Sol y el centro galáctico. Por lo tanto, nuestra estrella se halla muy cerca de ese plano medio. También verificamos que, en las regiones externas de la Vía Láctea, el plano se va deformando hacia arriba en su extremo norte y hacia abajo en su extremo sur (como una patata frita de bolsa), como apuntaban los estudios previos [*véase* «El lado oscuro de la Vía Láctea», por Leo Blitz; Investigación y Ciencia, diciembre de 2011].

Para describir sus observaciones, los astrónomos dividen la Vía Láctea en cuadrantes, con el Sol en el centro. Nosotros hemos estudiado los brazos espirales en los tres primeros cuadrantes, pero para el cuarto necesitamos observaciones desde el hemisferio sur, que se obtendrán con telescopios ubicados en Australia y Nueva Zelanda. Mientras llegan, podemos extrapolar los brazos que ya conocemos al cuarto cuadrante, usando información auxiliar procedente de las observaciones del hidrógeno atómico y el monóxido de carbono. La configuración resultante coincide con las estructuras que ya se habían postulado: los brazos de Norma-exterior, Escudo-Centauro–ECE, Sagitario-Carina y Perseo. Aun así, hay que tener en cuenta que solo conocemos la distancia a una región de formación estelar muy alejada del centro galáctico. La ubicación de esa región y su posición en los diagramas de velocidad-longitud para las emisiones del monóxido de carbono nos dan cierta confianza en nuestro modo de conectar los brazos en la zona más distante del centro de la Vía Láctea, aunque harán falta más mediciones para validar nuestro modelo.

Ahora tenemos una imagen más nítida de nuestro vecindario cósmico. Parece que vivimos en una galaxia espiral con cuatro brazos, una brillante barra central y un razonable grado de simetría. El Sol se sitúa casi en su plano medio, a unos dos tercios de camino entre el centro y el borde de la galaxia. Además de unos brazos que la rodean casi por completo, la Vía Láctea posee al menos un segmento adicional (el brazo local) y seguramente numerosas espuelas. Estas características confieren a nuestra galaxia un aspecto bastante normal, aunque ciertamente atípico. Casi dos terceras partes de las galaxias espirales presentan barras, así que en ese sentido la Vía Láctea no es especial. Sin embargo, sus cuatro brazos espirales claramente definidos y bastante simétricos la distinguen de la mayoría de las galaxias espirales, que tienen menos brazos y más desordenados.

MÁS MISTERIOS

Si bien hemos obtenido nuevas respuestas, aún quedan cuestiones relevantes por resolver. Para empezar, los astrónomos siguen sin ponerse de acuerdo sobre el origen de los brazos espirales. Según dos teorías alternativas, o bien se deben a inestabilidades gravitatorias a escala galáctica que generan patrones persistentes de ondas espirales, o bien a inestabilidades a menor escala que se extienden y amplifican con el tiempo para crear segmentos de brazo que luego se unen. Los brazos espirales de la primera teoría pueden perdurar muchos miles de millones de años, mientras que los de la segunda son estructuras menos longevas que aparecen en numerosas ocasiones a lo largo de la vida de una galaxia.

También resulta difícil determinar la edad de la Vía Láctea, ya que no tiene una fecha clara de nacimiento: pensamos que fue aglutinándose durante eones, a medida que cuantiosas protogalaxias más pequeñas y antiguas chocaban y se fusionaban. Es probable que la Vía Láctea ya fuera reconocible como una gran galaxia hace unos cinco mil millones de años, aunque con un aspecto bastante distinto al actual, pues las grandes colisiones habrían alterado cualquier estructura espiral.

Mejorar nuestra imagen más reciente de la Vía Láctea requerirá muchas más observaciones, que llegarán gracias a la próxima generación de redes de radiotelescopios capaces de aplicar VLBI. Entre ellas figuran la Red del Kilómetro Cuadrado (SKA), en África y Australia, y la Red Muy Grande de Próxima Generación (ngVLA), en Norteamérica, dos enormes baterías de radiotelescopios que se extenderán a lo largo de sus respectivos continentes y podrían estar operativas a finales de esta década. Al aumentar considerablemente el área colectora, estos sistemas permitirán detectar señales de radio mucho más débiles y, por lo tanto, ver más lejos a través de la Vía Láctea. En última instancia, esperamos acabar de desentrañar la arquitectura a gran escala de nuestra galaxia, para confirmar o refutar las teorías sobre el origen de su inmensa estructura espiral. IyC

PARA SABER MÁS

Studies in galactic structure, I: A preliminary determination of the space distribution of the blue giants. W. W. Morgan, A. E. Whitford y A. D. Code en *The Astrophysical Journal*, vol. 118, págs. 318-322, septiembre de 1953.
The Milky Way in molecular clouds: A new complete CO survey. T. M. Dame, D. Hartmann y P. Thaddeus en *The Astrophysical Journal*, vol. 547, n.º 2, págs. 792-813, febrero de 2001.
Mapping spiral structure on the far side of the Milky Way. Alberto Sanna et al. en *Science*, vol. 358, págs. 227-230, octubre de 2017.
Trigonometric parallaxes of high-mass star-forming regions: Our view of the Milky Way. M. J. Reid et al. en *The Astrophysical Journal*, vol. 885, n.º 2, art. 131, noviembre de 2019.

EN NUESTRO ARCHIVO

La galaxia de la Vía Láctea. Bart J. Bok en *IyC*, mayo de 1981.
Radioastronomía por interferometría de muy larga base. Anthony C. S. Readhead en *IyC*, agosto de 1982.
El primer mapa 3D de la Vía Láctea. Carme Jordi y Eduard Masana en *IyC*, marzo de 2019.

FARMACOLOGÍA

Inteligencia artificial para descubrir fármacos

La industria farmacéutica atraviesa una mala racha en el desarrollo de medicamentos. ¿Hasta qué punto puede ayudar la inteligencia artificial?

David H. Freedman

HAY MUCHAS RAZONES QUE PUEDEN LLEVAR A DESCARTAR UN MEDICAMENTO PROMEtedor durante su desarrollo farmacéutico, y el sistema del citocromo P450 es una de ellas. El CYP450, como suele denominarse, es un grupo de enzimas producidas sobre todo en el hígado y que intervienen en la descomposición de sustancias químicas, evitando que alcancen concentraciones peligrosas en el torrente sanguíneo. Pero resulta que muchos fármacos experimentales inhiben la producción del CYP450, un molesto efecto secundario que puede hacerlos tóxicos para el ser humano.

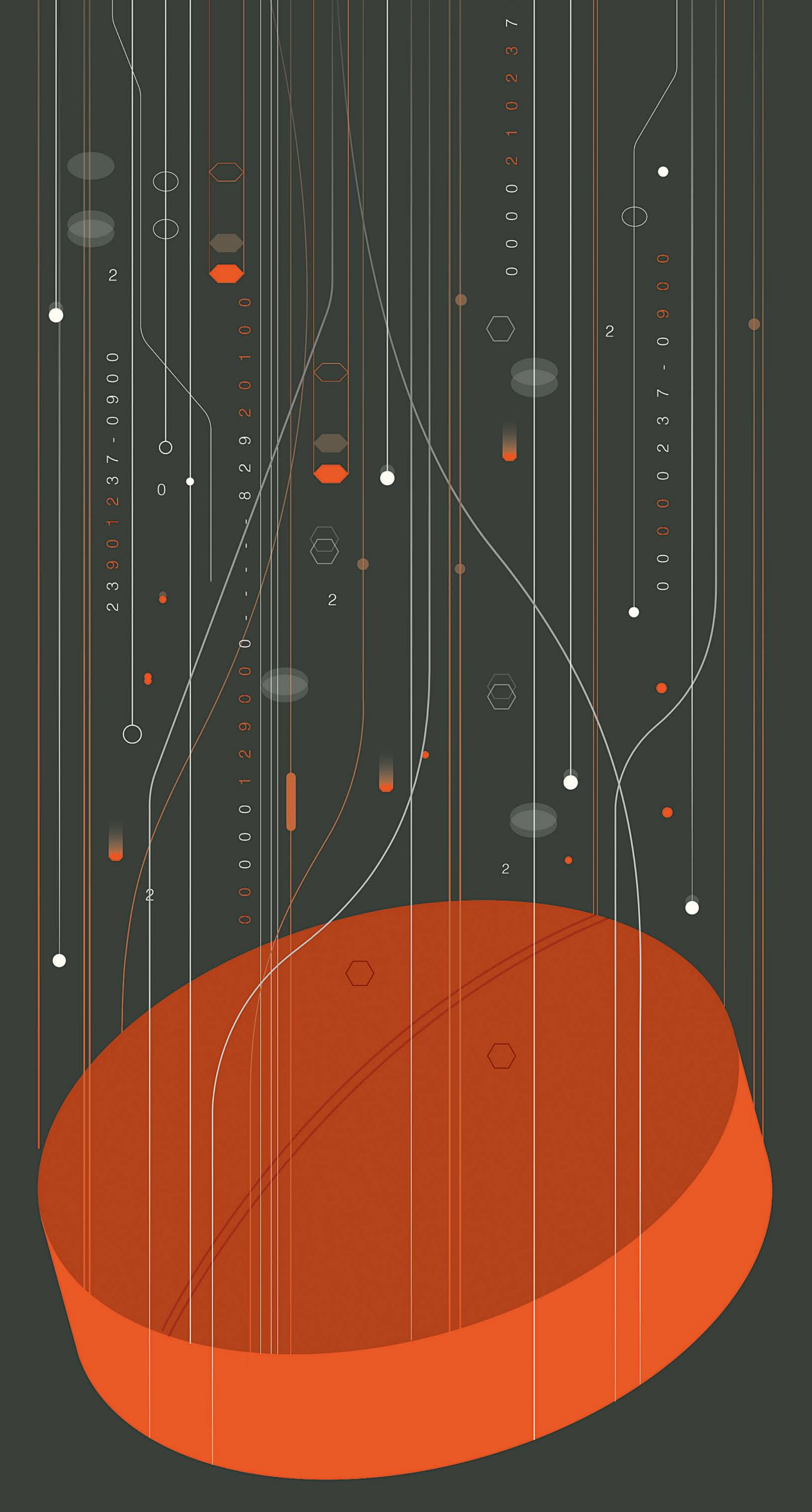
EN SÍNTESIS

A las compañías farmacéuticas cada vez les cuesta más obtener fármacos eficaces y rentabilizar sus inversiones en investigación. La solución podría hallarse en la inteligencia artificial.

Las herramientas de aprendizaje automático y aprendizaje profundo pueden identificar proteínas «diana» implicadas en un trastorno y fármacos que las modifiquen sin producir efectos indeseados.

Muchas farmacéuticas ya han adoptado este enfoque. Aunque los primeros resultados son prometedores, aún es pronto para saber si se traducirán en más y mejores medicamentos.

HARRY CAMPBELL



Durante mucho tiempo, para predecir si un medicamento experimental inhibirá el CYP450 en los pacientes, las compañías farmacéuticas han recurrido a métodos estándar tales como realizar análisis químicos en tubos de ensayo, observar las interacciones del CYP450 con fármacos conocidos de propiedades químicas similares y llevar a cabo pruebas en ratones. Sin embargo, estas predicciones resultan erróneas un tercio de las veces. En tales casos, puede que la toxicidad relacionada con el CYP450 solo salga a la luz durante los ensayos clínicos en seres humanos, lo que se traduce en millones de dólares y años de esfuerzo desperdiciados. Esta costosa inexactitud a veces llega a parecer «nuestra cruz», lamenta Saurabh Saha, vicepresidente de investigación y desarrollo y medicina traslacional de Bristol-Myers Squibb.

Ese tipo de ineficiencias contribuyen a un problema más grave: el desarrollo de medicamentos y la productividad de la billonaria industria farmacéutica mundial llevan al menos dos décadas en declive. Las compañías gastan cada vez más (unos 80.000 millones de dólares al año entre las diez firmas más grandes) y obtienen cada vez menos fármacos eficaces. Hace diez años, cada euro invertido en investigación y desarrollo generaba un beneficio de 10 céntimos, mientras que hoy en día no llega a 2 céntimos. En parte, eso se debe a que los fármacos más fáciles de encontrar o que tratan las enfermedades comunes de manera segura y eficaz ya se han descubierto; resta buscar medicamentos para problemas con soluciones complejas y esquivas, o dirigidos a trastornos que afectan solo a una pequeña parte de la población, los cuales serían mucho menos rentables.

Debido a la creciente dificultad para encontrar nuevos fármacos, el coste medio de lanzar uno al mercado casi se duplicó entre 2003 y 2013, hasta alcanzar los 2600 millones de dólares, según el Centro Tufts para el Estudio del Desarrollo de Fármacos. Estas mismas dificultades han provocado que los medicamentos tarden hasta 12 años en pasar del laboratorio al mercado y que el 90 por ciento de ellos se descarten en alguna de las fases de ensayos clínicos.

Así pues, no es de extrañar que la industria se muestre entusiasmada con la aplicación de la inteligencia artificial (IA) a la búsqueda de fármacos. Las herramientas basadas en IA no emplean métodos analíticos desarrollados por expertos, sino que los usuarios les proporcionan problemas de muestra (una molécula) y sus soluciones (su comportamiento como fármaco) y el programa elabora sus propias estrategias computacionales para producir las mismas soluciones.

Gran parte de las aplicaciones que emplean la IA para hallar nuevos medicamentos recurren a una técnica llamada aprendizaje automático [*véase* «Técnicas de aprendizaje automatizado», por Yaser S. Abu-Mostafa; Investigación y Ciencia, abril de 2013], y en particular al aprendizaje profundo [*véase* «Aprendizaje profundo», por Yoshua Bengio; Investigación y Ciencia, agosto de 2016]. La mayoría de los algoritmos de aprendizaje automático pueden trabajar con pequeños conjuntos de datos organizados y etiquetados, mientras que los de aprendizaje profundo son capaces de procesar datos en bruto (no estructurados) y requieren volúmenes mucho mayores. Por ejemplo, un programa de aprendizaje automático podría llegar a reconocer los diferentes elementos de una célula tras haberle enseñado decenas de miles de fotografías con las partes de la célula etiquetadas. Una versión basada en el aprendizaje profundo lograría distinguir dichas partes por sí misma a partir de imágenes de células sin etiquetar, pero quizá necesitaría examinar un millón de ellas.

David H. Freedman es periodista científico especializado en ciencia, tecnología y economía.



Muchos científicos de este campo consideran que la IA acabará mejorando varios aspectos del desarrollo de fármacos: identificará candidatos más prometedores, incrementará la «tasa de éxito» (el porcentaje de candidatos que superan los ensayos clínicos y obtienen la aprobación de las autoridades sanitarias) y acelerará todo el proceso. Por ejemplo, Bristol-Myers Squibb implementó recientemente un programa de aprendizaje automático entrenado para encontrar patrones relacionados con la inhibición del CYP450 en los datos. Saha asegura que el programa alcanzó una exactitud del 95 por ciento en las predicciones sobre el CYP450, lo que implica que falló seis veces menos que los métodos tradicionales. Estos resultados ayudan a los investigadores a detectar enseguida las sustancias potencialmente tóxicas y a centrarse en aquellas con más opciones de superar los diversos ensayos en pacientes requeridos por agencias como la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos (FDA, por sus siglas en inglés) de EE.UU. «La inteligencia artificial puede tener un enorme impacto a la hora de descartar fármacos en las primeras etapas, antes de invertir mucho en ellos», corrobora Vipin Gopal, director de análisis de datos de Eli Lilly.

Este campo cuenta cada vez con más recursos. Las empresas emergentes dedicadas al descubrimiento de fármacos mediante IA consiguieron más de 1000 millones de dólares de financiación en 2018, y hasta el pasado septiembre iban camino de recaudar 1500 millones en 2019. Todas las grandes compañías farmacéuticas han anunciado acuerdos con alguna de ellas. Sin embargo, aún hay pocos fármacos descubiertos con IA listos para las pruebas en humanos y ninguno ha comenzado los ensayos de fase III, la prueba de referencia para los medicamentos experimentales. Saha admite que pasarán varios años antes de poder valorar si el uso de IA para predecir la inhibición del CYP450 aumenta las tasas de éxito de la compañía. Pese a la euforia de la industria, no está claro que los primeros resultados vayan a traducirse en más y mejores medicamentos.

EXAMINAR MILLONES DE MOLÉCULAS

Los nuevos programas de IA tampoco suponen una modernización revolucionaria de la industria farmacéutica, la cual lleva tiempo construyendo complejas soluciones analíticas que facilitan el desarrollo de fármacos. Hace más de una década, la aparición de potentes programas estadísticos y de modelización biofísica como parte del auge de la bioinformática (el uso de técnicas computacionales para extraer conclusiones biológicas a partir de grandes cantidades de datos) derivó en herramientas capaces de predecir las propiedades de las moléculas. Sin embargo, los científicos no comprenden del todo cómo interactúan las moléculas, y eso ha limitado el alcance de dichas aplicaciones: no es posible conseguir que un *software* convencional extraiga información relevante si desconocemos qué elementos de los datos tienen mayor importancia y cómo se relacionan entre sí. Los nuevos programas de IA son capaces de identificar esos elementos y ofrecen mejores predicciones para un abanico más amplio de variables.

Las herramientas de IA abordan diversos aspectos del descubrimiento de fármacos desde distintas perspectivas. Algunas

empresas de IA se centran en diseñar un fármaco seguro y eficaz que actúe sobre una determinada diana terapéutica, por lo general alguna proteína bien estudiada que esté relacionada con un trastorno. El objetivo es conseguir una molécula que pueda unirse químicamente a la proteína diana y modificarla de modo que deje de contribuir a la enfermedad o a sus síntomas. Cyclica, una compañía canadiense, usa sus programas para cotejar las estructuras biofísicas y propiedades bioquímicas de millones de moléculas con las de unas 150.000 proteínas, con el fin de determinar qué compuestos es más probable que se fijen a las dianas y cuáles evitar.

Pero las moléculas con potencial como fármacos aún han de salvar otros obstáculos: deben pasar del intestino al torrente sanguíneo sin que el hígado o los procesos metabólicos las descompongan de inmediato; actuar en un órgano concreto, como el riñón, sin alterar los demás; evitar unirse a los miles de proteínas del cuerpo humano que son importantes para la salud, a fin de no desactivarlas; y descomponerse y abandonar el organismo antes de alcanzar concentraciones peligrosas. Los programas de Cyclica tienen en cuenta todos estos requisitos. «Una molécula capaz de interactuar con una proteína específica normalmente podrá hacerlo con otras 300, o más», señala el presidente y director ejecutivo de Cyclica, Naheed Kurji. «Al diseñar una molécula, debemos considerar las otras 299 interacciones que podrían tener efectos desastrosos en el ser humano.»

Los investigadores biomédicos son cada vez más conscientes de que las enfermedades complejas como el cáncer y el alzhéimer involucran cientos de proteínas, así que es probable que no baste con actuar sobre una sola. Cyclica trata de encontrar compuestos capaces de interactuar con decenas de proteínas diana sin afectar a otros muchos cientos de ellas, explica Kurji. Y añade que han empezado a incorporar multitud de datos genéticos anónimos sobre variaciones en las proteínas, gracias a los cuales el programa podrá determinar en qué pacientes serán más eficaces los posibles medicamentos. Kurji afirma que, en conjunto, estas características conseguirán recortar cinco de los siete años que suelen transcurrir desde la identificación del fármaco candidato hasta las pruebas en humanos.

Merck y Bayer son dos de las grandes farmacéuticas que han anunciado acuerdos con Cyclica. Como suele ocurrir en este tipo de colaboraciones, las compañías no han dado demasiada información sobre los medicamentos generados mediante IA que podrían obtenerse. Pero Cyclica ha compartido algunos detalles de sus éxitos en la identificación de dos proteínas diana: una vinculada a la esclerodermia generalizada, una enfermedad autoinmunitaria de la piel y otros órganos, y otra al virus del Ébola. Para hallarlas, partieron de fármacos candidatos que ya han sido aprobados por la FDA para el tratamiento de otras afecciones (infección por VIH y depresión, respectivamente), lo que significa que ambos podrían readaptarse para las nuevas indicaciones si la investigación continúa dando frutos.

En ocasiones, los investigadores encuentran una proteína diana que podría desempeñar un papel clave en una enfermedad, pero cuya estructura y propiedades no se conocen demasiado bien (como ocurre con cerca del 90 por ciento de las proteínas del cuerpo humano). Con tan pocos datos, la mayoría de los algoritmos de aprendizaje automático y aprendizaje profundo no lograrán averiguar cómo «modular» la proteína; es decir, no encontrarán compuestos que se unan a ella y cumplan el resto de criterios de seguridad y eficacia. Un puñado de empresas de IA se centran en estos problemas de «microdatos», entre ellas Exscientia, que emplea su *software* para buscar moléculas que puedan actuar sobre una diana terapéutica. El programa es capaz de generar información útil con tan solo 10 datos sobre una proteína, asegura Andrew Hopkins, director ejecutivo de la empresa y profesor de informática médica en la Universidad de Dundee.

Los algoritmos de Exscientia comparan la exigua información disponible sobre una proteína diana con una base de datos de unos mil millones de interacciones proteicas. Este paso reduce la lista de compuestos que podrían funcionar y establece qué datos adicionales ayudarían a refinar aún más la búsqueda. Estos podrían obtenerse, por ejemplo, observando muestras de tejido para entender mejor cómo se comporta la proteína en el organismo. La nueva información se introduce en el algoritmo, que vuelve a recortar la lista y solicita otra serie de datos. El proceso se repite hasta que el programa está en condiciones de generar un conjunto manejable de posibles fármacos para esa diana.

Hopkins sostiene que el método de Exscientia podría acortar la etapa de descubrimiento de cuatro años y medio a tan solo un año, abaratar los costes en un 80 por ciento y reducir cinco veces el número de compuestos que hay que sintetizar para producir un único medicamento exitoso. Exscientia colabora con el gigante biotecnológico Celgene en la búsqueda de posibles fármacos para tres dianas.

El 90 por ciento de los medicamentos experimentales se descartan durante las pruebas en pacientes, tras años de inversiones. La inteligencia artificial podría hacer que el proceso fuera más eficiente

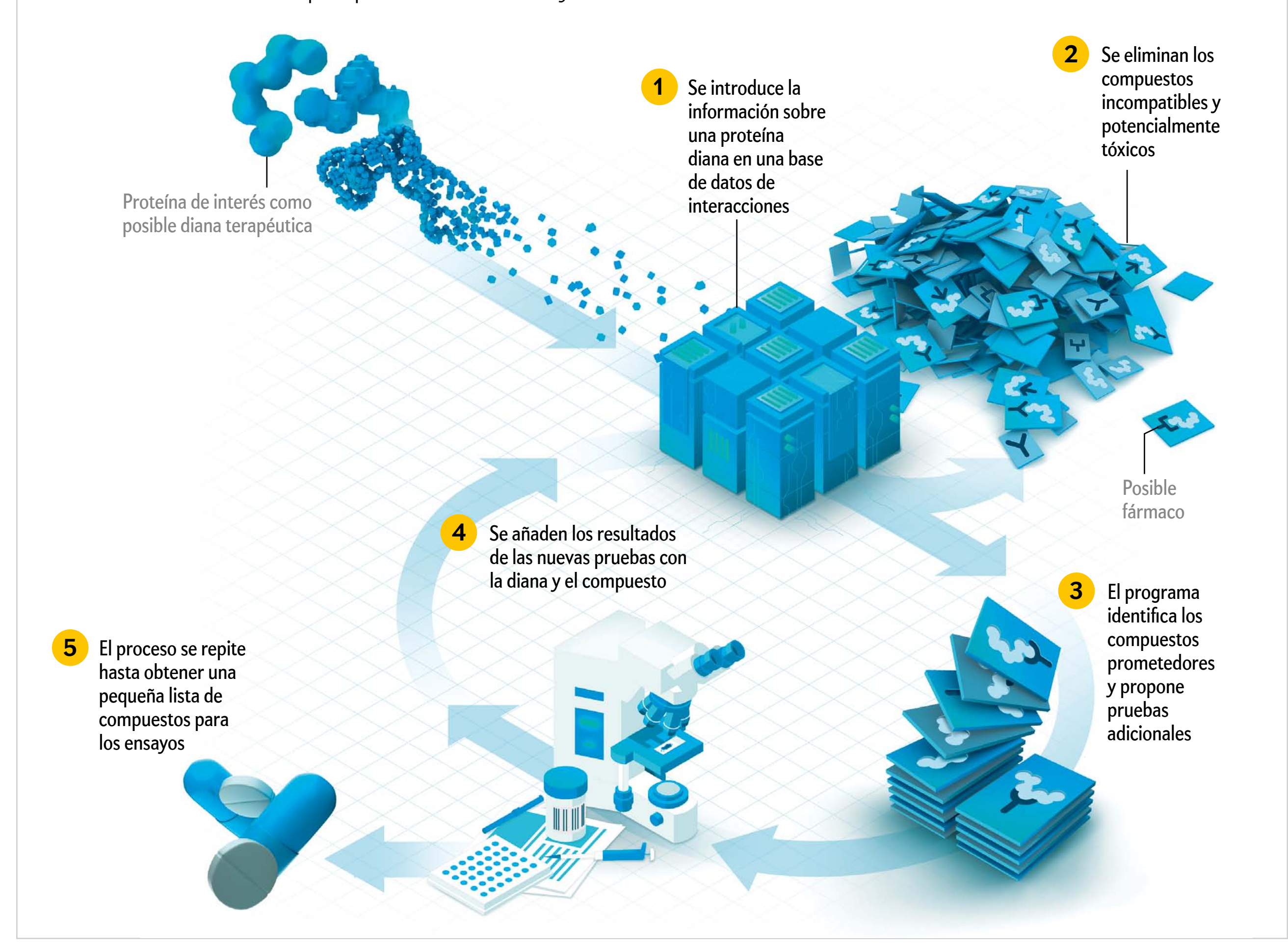
Entretanto, la alianza de Exscientia con GlaxoSmithKline ha conducido a lo que ambas empresas describen como una molécula prometedora para tratar la enfermedad pulmonar obstructiva crónica por una nueva vía. Como ocurre con cualquier empresa de IA dedicada al desarrollo de fármacos, Exscientia no lleva tanto en el negocio como para haber propuesto suficientes compuestos que hayan podido llegar a las últimas fases de ensayo (un proceso que suele durar de cinco a ocho años), pero Hopkins afirma que uno de esos candidatos podría comenzar a probarse en pacientes en breve. «A fin de cuentas, nos juzgarán por los medicamentos que obtengamos», concluye.

LA NECESIDAD DE NUEVAS DIANAS

Hallar moléculas que actúen sobre nuevas dianas terapéuticas no es el único reto al que se enfrenta el desarrollo de fármacos: para empezar, hay que identificar dichas dianas. La compañía biofarmacéutica Berg trata de detectar las proteínas que podrían estar implicadas en una enfermedad empleando IA para escudriñar la información procedente de muestras de tejido humano. Este enfoque aspira a resolver dos problemas que afectan a gran parte de las investigaciones sobre dianas farmacológicas, según el director ejecutivo de Berg, Niven R. Narain: los trabajos tienden a basarse en una hipótesis o corazonada del investigador, lo que puede introducir un sesgo en los resultados y restringir demasiado el conjunto de proteínas candidatas, y con frecuencia encuentran dianas que guardan una relación no causal con la enfermedad, por lo que resulta inútil modularlas.

Acelerar la búsqueda de fármacos

El desarrollo de un medicamento suele comenzar con la identificación de una proteína «diana» implicada en un trastorno. La meta es hallar una sustancia capaz de unirse a la proteína e interrumpir el curso de la enfermedad. Dada una diana, el programa de inteligencia artificial de Exscientia predice los compuestos prometedores, así como las pruebas adicionales que podrían reducir la lista de candidatos lo bastante como para pasar a la fase de ensayos.



CAMPBELL MEDICAL ILLUSTRATION

La estrategia de Berg implica utilizar toda la información que se pueda extraer de las muestras de tejidos, líquidos corporales y análisis de sangre de un paciente. Eso supone incluir datos genómicos, proteómicos, metabolómicos o lipidómicos, un espectro inusualmente amplio en la búsqueda de dianas. Se toman muestras de personas con una determinada enfermedad (en distintos momentos de su evolución) y sin ella, y las células vivas de esas muestras se exponen en el laboratorio a diversas sustancias y condiciones, como concentraciones bajas de oxígeno o altas de glucosa. El método registra los correspondientes cambios en aspectos que van desde la capacidad de una célula para producir energía hasta la rigidez de su membrana.

A continuación, se introducen todos los datos en un conjunto de programas de aprendizaje profundo que intentan encontrar diferencias entre el estado sano y el patológico, con el propósito de centrarse en las proteínas cuya presencia parezca influir en la enfermedad. En algunos casos, esas proteínas se convierten en candidatas a dianas, y entonces el programa de Berg empieza a rastrear compuestos capaces de modularlas. Además, dado que el algoritmo discierne si una proteína parece causar la enfermedad solo en un subconjunto de pacientes, puede buscar características distintivas de estos, como ciertos genes. Eso abre la puerta a la medicina de precisión: es posible examinar a los pacientes antes de que tomen un medicamento y determinar si está indicado para ellos.

El compuesto más interesante de los que ha encontrado Berg (y tal vez de todos los que ha brindado la IA) es un fármaco contra el cáncer llamado BPM31510, con el que se acaba de completar un ensayo de fase II en pacientes con cáncer de páncreas avanzado, que es muy agresivo y difícil de tratar. Aunque los estudios de fase I no suelen dar muchas pistas sobre el potencial de un medicamento, más allá de si es tóxico a determinadas dosis, el de BPM31510 en otros tipos de cáncer confirmó, en cierta medida, la capacidad del programa de Berg para predecir qué pacientes tenían más probabilidades de responder al tratamiento (en torno al 20 por ciento) o de sufrir reacciones adversas.

Gracias al análisis de las muestras de tejido tomadas en ese ensayo, el programa de Berg pronosticó algo poco intuitivo: que el fármaco funcionaría mejor contra los tipos de cáncer más agresivos, porque los mecanismos sobre los que actúa cobran

más importancia en esos tumores. Si el medicamento se autoriza, Berg podría evaluarlo tras su salida al mercado, examinando quizás a uno de cada 100 pacientes que lo tomen «para seguir mejorando la forma en que se administra», explica Narain.

Berg colabora con el gigante farmacéutico AstraZeneca en la búsqueda de dianas para tratar el párkinson y otras enfermedades neurológicas, y con Sanofi Pasteur en la mejora de la vacuna contra la gripe. También trabaja con el Departamento de Asuntos de los Veteranos de EE.UU. y con la Clínica de Cleveland en dianas para tratar el cáncer de próstata. Su *software* ya ha identificado mecanismos para distinguir esta afección de la hiperplasia benigna (algo que actualmente es difícil de conseguir sin cirugía) por medio de pruebas diagnósticas. [Berg, Exscientia, Cyclica y muchas otras compañías y organizaciones de todo el mundo también están aplicando la IA a la búsqueda de tratamientos para la COVID-19.]

CONTENER LA EUFORIA

Para calibrar el interés de la industria farmacéutica por integrar este nuevo tipo de herramientas en el desarrollo de medicamentos, baste mencionar que ya se han anunciado al menos 20 colaboraciones distintas entre las principales compañías y empresas tecnológicas de IA. Parece que grupos farmacéuticos como Pfizer, GlaxoSmithKline y Novartis también han adquirido una importante experiencia interna en IA, y es probable que otros estén haciendo lo propio.

Aunque los directores de investigación de estas compañías han expresado su entusiasmo por los primeros resultados, no dudan en admitir que la IA no constituye una apuesta segura, dado el escaso número de compuestos derivados mediante estas técnicas que han alcanzado la etapa de ensayos en animales, no digamos ya en seres humanos. Aún está por ver si la IA hará más eficiente el proceso de descubrimiento de fármacos, según Sara Kenkare-Mitra, vicepresidenta de ciencias de desarrollo en Genentech, una filial de Roche; e incluso si fuera así, «es pronto para saber si será un aumento progresivo o un salto exponencial». Aunque muchos de los medicamentos obtenidos con la ayuda de la IA progresen en las pruebas en pacientes, la cuestión seguirá sin respuesta a menos que acaben recibiendo la aprobación de las autoridades sanitarias.

Saha, de Bristol-Myers Squibb, opina que la entrada en el mercado de los fármacos diseñados mediante IA será lenta durante algún tiempo. Sin embargo, el ritmo podría acelerarse drásticamente si se optimizaran los procesos de ensayo y aprobación para tener en cuenta que los sistemas de aprendizaje automático y aprendizaje profundo pueden predecir de manera más precisa si los fármacos serán seguros y eficaces, y para qué pacientes están indicados. «Cuando las agencias reguladoras vean en la IA las posibilidades que vemos nosotros, puede que se abran las puertas», vaticina. «En algunos casos, quizá nos permitan saltarnos los modelos animales y pasar directamente a los ensayos clínicos, cuando hayamos demostrado que los fármacos pueden actuar sobre las dianas sin resultar tóxicos.» Pero admite que seguramente aún faltan muchos años para que ocurran estos cambios, y añade que es un error insinuar que la IA reemplazará a los científicos y acabará con la investigación tradicional: aunque brinda una ayuda considerable, la IA sigue dependiendo del ser humano para generar nuevos conocimientos biológicos, fijar líneas de investigación y prioridades, guiar y validar los resultados, y producir los datos necesarios.

Lo cierto es que la euforia desmedida en torno al descubrimiento de fármacos basado en la IA podría resultar perjudicial, apunta Narain, de Berg, pues las expectativas poco realistas pueden causar decepción y rechazo. «Estamos muy al principio, y debemos ser conscientes de que por el momento solo se trata de herramientas que pueden ayudar, no de soluciones», indica. Kurji, de Cyclica, acusa a las empresas de IA de lanzar reclamos publicitarios exagerados, como el de haber reducido los muchos años y miles de millones de dólares que requiere la síntesis de un fármaco a unas pocas semanas y unos cientos de miles de dólares. «Es sencillamente falso», sentencia. «Son afirmaciones irresponsables y perniciosas.»

Aunque la euforia pueda perjudicar al sector del descubrimiento de fármacos basado en IA, Kurji insiste en que también sabe qué podría impulsarlo enormemente: más información de alta calidad que suministrar a los distintos programas. «Dependemos de tres cosas: datos, datos y más datos», asegura. Esta opinión la secunda Enoch Huang, vicepresidente de ciencias médicas de Pfizer, que afirma que tener el algoritmo adecuado no es el factor más importante.

La necesidad de suministrar grandes volúmenes de datos relevantes a los programas de IA está empezando a cambiar la ciencia, puesto que los investigadores realizan cada vez más experimentos concebidos para generar esa información. Kenkare-Mitra, de Genentech, señala que eso ya es una realidad en la investigación de fármacos de inmunoterapia. «La práctica clínica no siempre proporciona tantos datos como precisa el aprendizaje automático», incide. «Pero a menudo podemos generarlos *in vitro* e introducirlos en el sistema.»

Esta estrategia podría conducir a un círculo virtuoso en el descubrimiento de medicamentos, en el que la IA ayudaría a dilucidar las áreas donde los científicos necesitan buscar dianas y fármacos; y los consiguientes estudios proporcionarían grandes conjuntos de datos relevantes, que permitirían al programa informático señalar vías de investigación aún más fértiles. «No confiamos tanto en las máquinas», concluye Kenkare-Mitra, «como en la alianza entre el ser humano y la inteligencia artificial». IyC

Este artículo forma parte de «AI and digital health», informe especial publicado en febrero de 2020 en Scientific American *y* Nature*, con el patrocinio de F. Hoffmann-La Roche Ltd.*

PARA SABER MÁS

Innovation in the pharmaceutical industry: New estimates of R&D costs. Joseph A. DiMasi, Henry G. Grabowski y Ronald W. Hansen en *Journal of Health Economics*, vol. 47, págs. 20-33, mayo de 2016.
The antiretroviral agent nelfinavir mesylate: A potential therapy for systemic sclerosis. Cecilia G. Sanchez et al. en *Arthritis & Rheumatology*, vol. 70, n.º 1, págs. 115-126, enero de 2018.
The rise of deep learning in drug discovery. Hongming Chen et al. en *Drug Discovery Today*, vol. 23, n.º 6, págs. 1241-1250, junio de 2018.
Applications of machine learning in drug discovery and development. Jessica Vamathevan et al. en *Nature Reviews Drug Discovery*, vol. 18, págs. 463-477, abril de 2019.
Ten years on: Measuring the return from pharmaceutical innovation 2019. Informe elaborado por Deloitte, diciembre de 2019. Disponible en **https://bit.ly/2A59UfX**

EN NUESTRO ARCHIVO

Diseño racional de fármacos. Gerd Folkers y Hugo Kubinyi en *IyC*, noviembre de 1997.
Retos en el desarrollo de fármacos. Fernando Peláez en *IyC*, julio de 2017.
Diseño molecular asistido. Jeff Carbeck en «Las 10 técnicas emergentes más prometedoras del momento (2019)», *IyC*, febrero de 2019.

EVOLUCIÓN

EL INESPERADO ORIGEN DE LOS DEDOS

Un fósil singular revela que los dedos de la mano surgieron antes de que los vertebrados abandonasen el agua para colonizar la tierra firme

John A. Long y Richard Cloutier

Ilustración de Chase Stone



ELPISTOSTEGE WATSONI, un pez de 375 millones de años estrechamente emparentado con los animales tetrápodos, poseía huesos digitales en las aletas pectorales que le habrían ayudado a sostener el peso del cuerpo en tierra firme.

EN SÍNTESIS

La evolución de las extremidades en los tetrápodos a partir de las aletas de los peces ha permanecido durante mucho tiempo sumida en la incógnita a causa de la escasez de fósiles que reflejasen la transición.

El reciente descubrimiento del esqueleto completo de un pez de 375 millones de años está dando un vuelco a las ideas arraigadas acerca del origen de la mano y del ascenso de los tetrápodos.

John A. Long es profesor de paleontología en la Universidad Flinders, de Australia Meridional. Investiga la evolución de los primeros vertebrados, entre ellos la ictiofauna devónica de la formación Gogo, en Australia Occidental. Este año ha recibido el prestigioso premio Bettison y James Award, por sus méritos como científico y escritor.

Richard Cloutier es profesor de biología evolutiva en la Universidad de Quebec en Rimouski. Sus intereses como investigador giran en torno a los mecanismos evolutivos de los primeros vertebrados, así como la biología del desarrollo y evolutiva de los peces y anfibios modernos. Hace más de treinta años que estudia la fauna y la paleoecología del yacimiento devónico de Miguasha.

LOS CINCO DEDOS QUE BROTAN DE LA PALMA OFRECEN UNA DISPOSICIÓN A LA VEZ FLEXIble y robusta que faculta para tocar el piano, empuñar un martillo o acariciar con suavidad. La mano es la parte del cuerpo que nos resulta más familiar, imprescindible en multitud de tareas cotidianas, como vestirnos, conducir, cocinar o teclear. Pero, desde el punto de vista evolutivo, su origen remoto sigue en buena medida envuelto en el misterio. Las manos de otros animales de cuatro extremidades, denominados tetrápodos, presentan aspectos y propósitos notablemente distintos a los de las nuestras. En las aves y los murciélagos forman parte de las delicadas alas; en el elefante, soportan el peso de unas patas recias como troncos. Pero en unos y otros la estructura básica es idéntica. En 1859, Charles Darwin ya destacó esas semejanzas en *El origen de las especies*: «¿Qué puede haber más curioso que el que la mano del hombre, hecha para coger; la del topo, hecha para minar; la pata del caballo, la aleta de la marsopa y el ala de un murciélago estén todas construidas según el mismo patrón y encierren huesos semejantes en las mismas posiciones?».

Darwin propuso una explicación elegante: que animales tan distintos compartían el mismo esquema por ser descendientes de un antepasado común provisto de extremidades con dedos. En los más de 160 años que han transcurrido desde que diera a conocer su revolucionaria idea, los biólogos evolutivos han reunido pruebas aportadas por la paleontología, la genética y la embriología que demuestran su acierto. Tantos esfuerzos han iluminado el origen común de los tetrápodos, que tienen en los peces a sus lejanos antepasados; han demostrado que los huesos de la mano humana también se hallan presentes en una rana, un ave o una ballena; y han identificado algunos de los genes que controlan la formación de las manos, las alas y las aletas. Pero el primer capítulo de esta historia, el momento en que la mano y el carpo (muñeca) surgieron del esqueleto de la aleta de un pez ancestral, ha permanecido envuelto en tinieblas porque no se disponía de fósiles lo bastante completos de los protagonistas que abandonaron la vida acuática y se lanzaron a la conquista de la tierra firme.

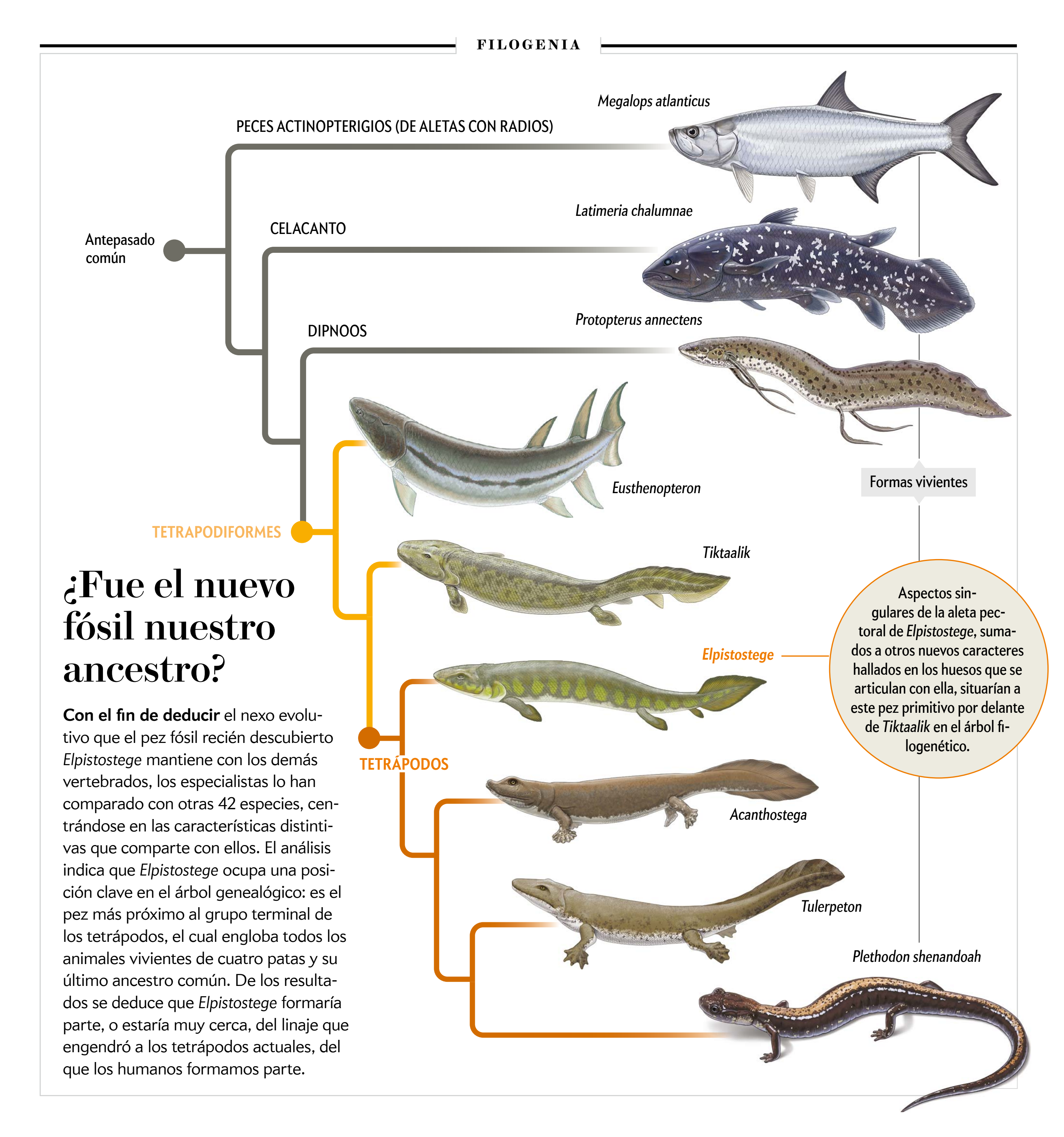
El pasado marzo presentamos un fósil extraordinario, un esqueleto completo de un pez de 375 millones de años de antigüedad, *Elpistostege watsoni*, que contribuirá notablemente a colmar las lagunas de nuestro conocimiento. El espécimen conserva en las aletas unos huesos equiparables a los de nuestros dedos, lo cual demuestra que estos surgieron antes de que los vertebrados abandonasen el agua. Este hallazgo rebate la opinión general sobre el momento y el modo en que la mano apareció y arroja nueva luz sobre el nacimiento de los tetrápodos, un acontecimiento fundamental en la historia de la vida en la Tierra.

ORÍGENES TURBIOS

Hasta hace poco, lo que un entendido podía saber del proceso evolutivo que condujo de los peces a los primeros tetrápodos dependía básicamente de un puñado de fósiles excepcionales que parecen relacionar ambos grupos zoológicos entre sí. Uno pertenece a un pez de nombre *Panderichthys rhombolepis*, hallado en la cuenca del Báltico y datado en el Devónico medio o superior, hace entre 384 y 379 millones de años. Dotado de un húmero largo y de una ulna y un radio voluminosos, así como de una anatomía craneana similar a la de un tetrápodo, *Panderichthys* ofreció las primeras pistas sobre el grupo de peces con miembros más afines a los tetrápodos. El grupo en cuestión es el de los elpistostegalianos, así llamado por el entonces poco conocido *Elpistostege*, descubierto en el este de Canadá.

En 2006, un grupo de investigación de la Universidad de Chicago encabezado por Neil Shubin anunció el descubrimiento en el Ártico canadiense de otro fósil de elpistostegaliano, *Tiktaalik roseae*, de 380 millones de años. El hallazgo supuso un punto de inflexión, pues aportó un gran volumen de datos nuevos gracias a una aleta pectoral muy avanzada —más que en cualquier otro pez fósil— y a un esqueleto de los miembros anteriores desarrollado, con articulaciones carpianas móviles. De igual modo, el cráneo mostraba rasgos distintivos, como un hocico largo y aplanado y una caja craneana especializada, ambos caracteres propios de los tetrápodos.

Este y otros fósiles elpistostegalianos indicaban, pues, que ciertos rasgos distintivos de los tetrápodos, como unos huesos y articulaciones braquiales adaptados a la marcha terrestre,



FUENTE: BRIAN CHOO; EMILY S. DAMSTRA (*ilustración*)

tenían su origen en antecesores acuáticos. Pero no parecía que ninguno de tales peces hubiese tenido dedos. En el caso de *Panderichthys*, los elementos óseos que en un primer momento muchos tomaron por partes de dedos rudimentarios quedaron descartados después como tales. Por otra parte, el fósil de *Tiktaalik* no conservaba la punta de la aleta pectoral, donde uno esperaría encontrar los huesos digitales, si los tuviere. Las pruebas disponibles llevaron a los entendidos a concluir que los dedos no formaron parte de la transición inicial de la aleta al quiridio, la extremidad de los vertebrados terrestres. En lugar de ello, debían haber surgido después, una vez que los tetrápodos ya se habían adentrado en la tierra firme.

Sin embargo, en ciencia ningún saber está esculpido en piedra. Todo está sujeto a enmienda a la luz de nuevas pruebas. Los descubrimientos que se suceden obligan a revisar los libros de texto. Uno de ellos es el fósil de *Elpistostege*, recientemente descrito por nosotros, que fue hallado en 2010 en el Parque Natural de Miguasha (Quebec), Patrimonio de la Humanidad de la UNESCO. No se trata de una especie inédita de elpistostegaliano. Lo novedoso es que esta vez contamos con un espécimen íntegro, en perfecto estado, que nos ha llevado a postular una teoría distinta sobre el modo en que los dedos evolucionaron y dieron lugar a la estructura de la mano que hoy persiste en las más de 33.800 especies vivientes de tetrápodos, entre ellas la humana.





EL ESQUELETO ÍNTEGRO DE *ELPISTOSTEGE WATSONI*, de 375 millones de años de antigüedad (*1*), descubierto en el Parque Nacional de Miguasha, en Quebec, es el primer fósil de pez tetrapodiforme que conserva entera la aleta pectoral (*2*). Esta alberga unos huesos digitales que son equivalentes a las falanges que forman los dedos humanos.

Conocer algunos pormenores de la historia de *Elpistostege* permitirá al lector calibrar su relevancia en la evolución de la mano y el giro de visión que trae consigo su descubrimiento. En el lejano verano de 1937, dos jóvenes paleontólogos británicos iniciaron una prospección en los acantilados de Chaleur Bay, en la orilla sur de la ventosa península de Gaspé, en la costa atlántica de Canadá. Thomas Stanley Westoll y William Graham-Smith buscaban fósiles devónicos y se sabía que en aquel lugar abundaban tales tesoros. A través de coleccionistas locales, se hicieron con una bóveda craneana incompleta que se convertiría en una de las piedras angulares de nuestro conocimiento sobre la transición de los peces a los vertebrados terrestres.

Ya en aquellos años, los eruditos sospechaban que los tetrápodos eran descendientes de los peces de aletas lobuladas (sarcopterigios), provistos de aletas carnosas y robustas, un grupo que aún hoy cuenta con el celacanto y los dipnoos como representantes vivos. Pero carecían de fósiles con una anatomía intermedia que cerraran el eslabón. La bóveda craneana parecía que ayudaría a cerrarlo. Por la disposición de los huesos, Westoll creyó estar ante el ansiado cráneo de un anfibio arcaico del Devónico, al que denominó *Elpistostege watsoni*. En un escueto artículo publicado en 1938 en *Nature*, argumentaba que el fósil proporcionaba «una transición perfecta» entre los peces sarcopterigios y los primeros cuadrúpedos.

Con solo un fragmento de cráneo, la argumentación de Westoll fue recibida con escepticismo. Había que encontrar más partes del animal. Paleontólogos llegados de toda Europa y Norteamérica emprendieron la búsqueda en los acantilados de Chaleur Bay, ahora pertenecientes al Parque Nacional de Miguasha, pero ninguno encontró ni un solo espécimen de *Elpistostege*.

Pero unos treinta años depués de la publicación de Westoll intervino la fortuna. Un coleccionista canadiense, Allan Parent, descubrió el hocico de un cráneo incompleto en los acantilados de Miguasha que permanecería ignorado en su colección privada hasta su trágica muerte prematura. Ya en 1983, su hermano mostró el hocico al director del parque de Miguasha, Marius Arsenault, quien acudió a Hans-Peter Schultze, eminente especialista en ictiofauna fósil de la Universidad de Kansas, para que lo identificase. Schultze reconoció de inmediato su importancia. Las similitudes entre la disposición y la morfología de los huesos craneanos de ese fósil con los de la bóveda craneana de Westoll no dejaban lugar a dudas: pertenecían a la misma especie.

Con el descubrimiento de nuevas partes del cuerpo, comenzaron a cambiar las ideas acerca de su identidad. Los rasgos visibles en el hocico hacían pensar que *Elpistostege* no era un anfibio, sino un pez de aletas lobuladas muy evolucionado. En un artículo de 1985 en el que describían la pieza, Schultze y Arsenault plantearon su estrecho parentesco con el fósil del

RICHARD CLOUTIER



Báltico *Panderichthys*. También analizaban otro espécimen enigmático, que conservaba un retazo de escamas y algunas vértebras, hallado hacía un par de años por Marc Brassard, biólogo jefe de Miguasha, y uno de nosotros (Cloutier) en los mismos acantilados. Dadas las semejanzas en la textura de las escamas conservadas en este fósil y en el hocico, Schultze y Arsenault propusieron que pertenecía también a *Elpistostege*.

La asignación del fragmento fosilizado de escamas y vértebras a *Elpistostege* supuso un paso importante. Además de ser entonces la única parte conocida que no pertenecía a la cabeza, se sabía algo de ella que del otro par de fósiles se ignoraba: la procedencia exacta. La bóveda craneana y el hocico habían sido desenterrados en los acantilados, pero se desconocía de qué estrato rocoso en concreto. En cambio, Brassard y Cloutier habían anotado con exactitud la localización estratigráfica de su hallazgo: 90 metros por encima de las capas inferiores de una unidad geológica denominada formación Escuminac.

En los años siguientes, Cloutier y sus colaboradores regresaron varias veces a esa parte de la formación, en busca de más restos de *Elpistostege*, en vano. Aun así, los indicios paleontológicos y geológicos les permitieron comenzar a reconstruir el ambiente del animal, un canal que desembocaba en un estuario. Comenzó a emerger un retrato de *Elpistostege* como el mayor pez de aquellas aguas, que compartía con otra veintena de peces.

Los datos paleoecológicos acabarían cobrando nueva relevancia. Bien entrada la tarde del 4 de agosto de 2010, durante una de las patrullas por Miguasha, el guarda forestal y naturalista Benoît Cantin encontró al pie de los acantilados de la playa un raro fragmento fosilizado de la cola de un pez, incrustado en los estratos del Escuminac inferior, a menos de 250 metros del museo del parque. A la mañana siguiente, acompañado por dos guías naturalistas, extrajo el resto. Es el mayor fósil descubierto jamás en la formación Escuminac y seguramente el más importante: un esqueleto de *Elpistostege* entero, de 1,57 metros.

VER A TRAVÉS DE LA PIEDRA

Pocos días después del descubrimiento, se invitó a Cloutier a que lo examinase. Como la mayoría del esqueleto permanecía oculto en la roca extraída, lo primero fue recurrir a la tomografía computarizada (TAC) para ver sus interioridades. Cloutier incorporó al proyecto a Isabelle Béchard, antigua alumna suya del máster de paleontología, para que le ayudase a obtener las imágenes con un tomógrafo del Instituto Nacional de Investigación Científica en la ciudad de Quebec. Las tomografías revelaron que estaba íntegro (conservaba todos y cada uno de los huesos), pero la resolución no era lo bastante buena para escrutar la estructura interna, así que tuvieron que buscar otro tomógrafo con mayor capacidad de resolución. Decidieron que *Elpistostege* viajase 3900 kilómetros al sur, hasta el Centro de Tomografía Computerizada de Alta Resolución de la Universidad de Texas en Austin, donde cada centímetro del fósil sería examinado.

Una vez concluidas las sesiones de exploración, Cloutier y su equipo comenzaron la ardua y meticulosa tarea de preparación, es decir, eliminar la roca circundante hasta dejar el esqueleto al descubierto. Esta labor se llevó a cabo con un modelo informático del fósil elaborado a partir de las tomografías y, consecutivamente, con el fósil real. En pocos meses emergieron el cráneo y el cuerpo de la matriz pétrea, tanto en el ámbito virtual como en el real. El espécimen entero era increíble, pero las aletas pectorales despertaron una gran expectación, pues nadie había visto ninguna entera de un elpistostegaliano. Aparecieron numerosos elementos esqueléticos rodeados de escamas y de radios. A primera vista, la aleta de *Elpistostege* se parecía bastante a la de *Tiktaalik*, pero parecía albergar algunos huesos más. ¿Qué eran?

Cloutier y Béchard presentaron durante los años siguientes los resultados preliminares de los análisis del esqueleto de *Elpistostege* en encuentros profesionales. Fue al término de una de esas presentaciones, en la reunión anual de la Sociedad de Paleontología de Vertebrados de EE.UU., celebrada excepcionalmente en Berlín en 2014, que Cloutier y el otro autor de este artículo (Long) acordaron ante unas cervezas colaborar en el estudio de este notable fósil.

Hace muchos años que Long investiga la ictiofauna devónica de la formación Gogo, en Australia Occidental. El esqueleto de esos peces primitivos se ha conservado perfectamente en tres dimensiones y algunos incluso mantienen las partes blandas, algo excepcional. Para estudiar esos fósiles, el equipo de Long sumerge los nódulos de caliza que los contienen en baños de ácido, que disuelven la roca. Desde hace algunos años emplea las tomografías y los análisis en sincrotrón, respaldados por complejos programas informáticos, para captar imágenes detalladas de los rasgos anatómicos antes del baño, pues el ácido destruye a veces elementos de las partes blandas. El nuevo espécimen de *Elpistostege*, con su primoroso estado de conservación, parecía un excelente candidato para aplicar los métodos de Long.

En 2014, este visitó el laboratorio de Cloutier en Quebec y comenzó a trabajar con su equipo sobre el mejor modo de combinar diversas técnicas de procesamiento de las imágenes. Se necesitaron varios ensayos de prueba y error con diferentes datos y programas hasta dar con la combinación perfecta, que hizo posible aislar digitalmente cada hueso y estudiarlo.

Cuando comenzaron a segmentar virtualmente la aleta pectoral, todos contuvimos el aliento. Como la primera aleta pectoral íntegra de elpistostegaliano descubierta, sin duda brindaría pistas vitales sobre la transición de la aleta al quiridio. Los resultados preliminares no defraudaron. No solo confirmaron los indicios de la primera tomografía de Béchard, que apuntaban a la existencia de huesos adicionales en la aleta de *Elpistostege*, sino que los mostraban con una resolución mucho mayor. Ahora era visible una multitud compacta de huesecillos en el fósil. La punta de la aleta pectoral alberga normalmente pequeños huesos radiales que, a modo de varillas, sostienen las aletas. Los huesos visibles en el extremo de la aleta de *Elpistostege* ocupaban

el lugar adecuado para ser radiales, pero los numerosos huesecillos y su disposición, con una parte en hileras claras, indicaban que eran algo más. Todo hacía pensar que esos huesos inéditos en la aleta pectoral de este pez primitivo eran huesos digitales, similares a los de los dedos de los tetrápodos. Discernimos con claridad dos dedos, formados por varios huesos articulados, y entrevimos otros tres, compuestos por un único hueso.

¿Por qué los huesos digitales de las aletas pectorales de *Elpistostege* resultan más convincentes que los correspondientes a *Panderichthys*? Los de este último son irregulares y ninguno está articulado como los de las falanges de la mano humana. Al compararlos con los huesos de la aleta de *Elpistostege*, conjeturamos que los misteriosos huesos de la aleta pectoral de *Panderichthys* eran probablemente equivalentes a algunos de los huesos carpianos que forman la muñeca de los tetrápodos.

COMO PEZ FUERA DEL AGUA

Mientras el equipo ultimaba el aislamiento del conjunto formado por la aleta pectoral y la cintura escapular para poder estudiarlos desde cualquier perspectiva, iniciamos la segmentación del interior del cráneo y, en particular, de la caja craneana (o neurocráneo). Esto no solo ayudaría a esclarecer la anatomía de *Elpistostege*, sino también su nexo con otros peces primitivos y los tetrápodos.

Para deducir la posición del pez en el árbol filogenético, había que compararlo con otras especies, prestando especial atención a los caracteres distintivos que fueran comunes. En cooperación con Mike Lee, de la Universidad Flinders, experto en los métodos con que se traza el parentesco entre las especies, acometimos un análisis filogenético con 202 características de 43 especies. Al acabar, vimos con sorpresa que *Elpistostege* parecía ser más cercano al grupo terminal de los tetrápodos —aquel que engloba todas las especies vivientes de tetrápodos y su último ancestro común— que el conocido *Tiktaalik*, aunque no por mucho. Nuestra suposición es que los atributos singulares de la aleta pectoral, que no se conserva íntegra en el espécimen de *Tiktaalik*, más otros rasgos recién descubiertos en la cintura escapular (cuyos huesos se articulan con las aletas pectorales) sitúan a *Elpistostege* un nivel por encima de *Tiktaalik* en la escala evolutiva.

Si se combina lo visto en el esqueleto de *Elpistostege* con lo que indica el análisis filogenético sobre el lugar que este ocupa en el árbol, es posible reconstruir de qué modo surgió el plan de organización básico de la mano de los tetrápodos, incluida la humana. La presencia de pequeñas filas de huesos que reconocimos como dedos en la aleta pectoral de *Elpistostege* muestra que la estructura anatómica surgió primero en las aletas de peces sarcopterigios evolucionados, al inicio del Devónico superior, hace más de 380 millones de años. Es probable que desempeñaran una función importante, puesto que la acumulación de tantos huesecillos en esa región debió de dotar al extremo de la robusta aleta con la flexibilidad necesaria para impulsar al pez hacia adelante.

¿Qué ventajas le reportaría a un pez marchar de ese modo? El cráneo de *Elpistostege* aporta una pista: en su parte posterior hay un par de orificios grandes, llamados espiráculos. Algunos peces actuales que respiran aire poseen espiráculos de ese tamaño. Durante mucho tiempo su función era incierta. Long trabajó con un grupo de ictiólogos del Instituto Scripps de Oceanografía en La Jolla, en California, dirigido por el difunto Jeff Graham, para resolver esa incógnita. En un estudio publicado en 2014 en el que analizaban los espiráculos de una especie viviente de bichir (*Polypterus*), comprobaron que resultan fundamentales para inhalar aire. Si suponemos que los espiráculos tuvieron idéntico propósito en *Elpistostege*, la posibilidad de emplear las aletas para caminar por el fondo de los ríos y los estuarios de aguas someras donde habitaba, y de alzar la cabeza fuera para respirar aire fresco, habría supuesto una ventaja.

Ahora bien, el hábitat de *Elpistostege* no tuvo por qué limitarse al medio acuático. Los dipnoos, o peces pulmonados, y algunos peces gato actuales son capaces de recorrer cortas distancias por tierra, impulsados con sus aletas. Las de *Elpistostege*, mucho más robustas, probablemente le permitieron aventurarse con más soltura en tierra firme.

LOS PRIMEROS PASOS

Además de poner patas arriba la hipótesis más difundida sobre el momento en que las aletas se transformaron en quiridios, nuestro descubrimiento de los huesos digitales en *Elpistostege* contribuye a aclarar los cambios genéticos y anatómicos que impulsaron esa transformación. Hace tan solo unas décadas, cualquier estudioso interesado en esta cuestión apenas disponía de información para comenzar, pues eran contados los ejemplos de peces fósiles cuya anatomía pectoral se situase a medio camino de las aletas y los quiridios, y solo dejaban entrever que los huesos del segmento anterior (el húmero) y posterior (la ulna y el radio) del quiridio evolucionaron de manera gradual. En cambio, parecía como si la mano y el carpo de los tetrápodos hubieran surgido al unísono de la aleta de un pez ancestral. ¿Es posible realmente que una transformación tan drástica ocurriese tan de repente? ¿O es esa súbita aparición de la mano y la muñeca un simple artefacto derivado de un registro fósil incompleto?

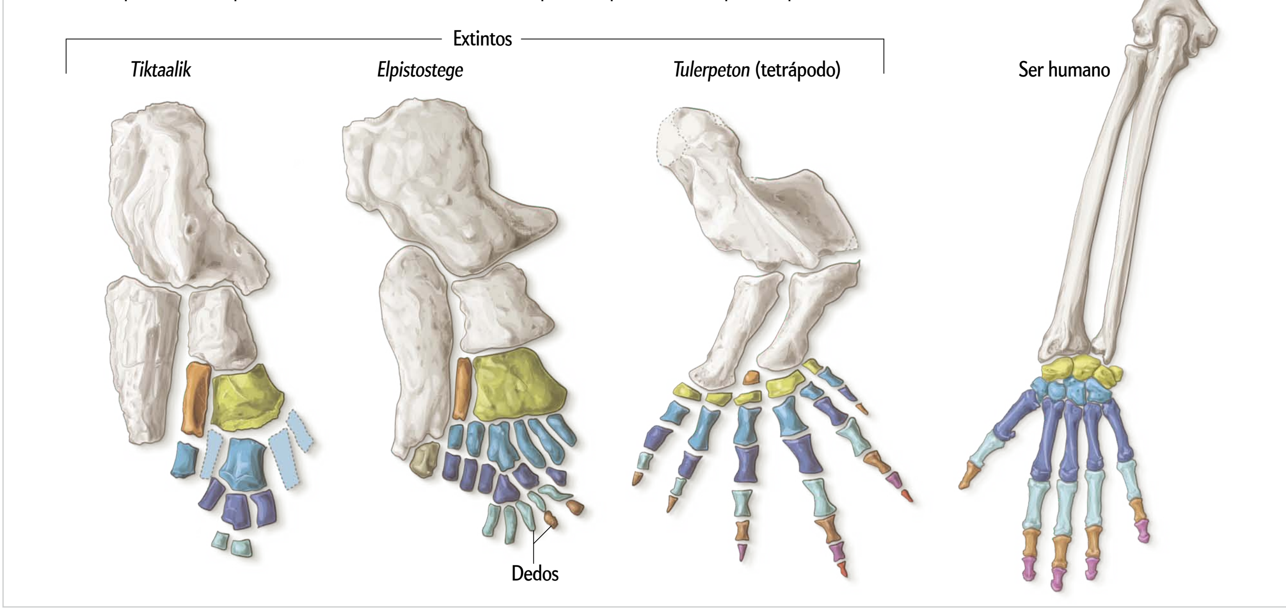
En un artículo trascendental publicado en 1991, Peter Thorogood, biólogo evolutivo hoy desaparecido, propuso que la mano y la muñeca habrían surgido de forma repentina. Fundamentó su hipótesis en comparaciones del desarrollo embrionario de los peces y los tetrápodos. En los embriones jóvenes de ambos grupos, una estructura llamada cresta ectodérmica apical actúa como centro emisor de las señales que guían el crecimiento de la aleta y del quiridio. Situada en el extremo del primordio de una y del otro, la cresta segrega sustancias que estimulan el crecimiento del tejido subyacente. En los peces, la cresta solo permanece activa durante el breve lapso que precede a su transformación en otro centro de señales, el pliegue ectodérmico apical, encargado de dirigir la formación de los radios de las aletas. En cambio, en los tetrápodos la cresta despliega una actividad mucho mayor en el control del desarrollo, pues persiste mucho más en el embrión; ni siquiera se transforma en el pliegue homónimo, razón por la cual no se forman los radios de las aletas. Así pues, dispone de más tiempo para crear los demás huesos del apéndice locomotor, que constituyen la estructura de la mano. Thorogood planteó que la pérdida de la transición de la cresta al pliegue (un retoque relativamente sencillo en el gran plano de la vida) pudo precipitar la pérdida de los radios y otros atributos de las aletas pectorales, así como la adquisición simultánea de los huesos que forman el carpo y los dedos.

El descubrimiento de *Tiktaalik*, el primer fósil que no solo mostró el equivalente en los peces de nuestro esqueleto braquial y de algunos de los huesos proximales del carpo (los más cercanos al centro del cuerpo), sino también los de la parte distal de la aleta, equivalentes a los huesos distales del carpo, impulsó el estudio de los fundamentos genéticos y del desarrollo del paso del agua a la tierra firme. Los investigadores deseaban saber qué huesos de la aleta del pez ancestral se transformaron en los huesos del carpo y de la mano y cuáles fueron los responsables

ENIGMA EVOLUTIVO

De la aleta a la mano

Desde hace décadas, los científicos pensaban que las manos evolucionaron primero en los tetrápodos como adaptación a la vida terrestre, porque los huesos digitales más antiguos conocidos se habían hallado en tetrápodos primitivos como *Tulerpeton*, no en peces tetrapodiformes como *Tiktaalik*. En cambio, la aleta de *Elpistostege* tiene huesos que debieron de constituir al menos dos dedos, tal vez incluso cinco. Esos huesos digitales son homólogos a los de las extremidades de los tetrápodos vivientes, incluido el ser humano. El descubrimiento revela que los dedos hicieron acto de aparición en peces acuáticos antes de ser adoptados por los tetrápodos para vivir en la tierra firme.



de crear esa morfología nueva. Miembros de la familia de los genes *Hox*, conocidos por dirigir las regiones del embrión que se transforman en la cabeza, la cola y las demás partes del cuerpo, probablemente intervendrían en el proceso.

En 2007, Zerina Johanson, del Museo de Historia Natural de Londres, y sus colaboradores estudiaron la actividad de uno de esos genes, *HoxD13*, en uno de los parientes vivos más cercanos de los tetrápodos, el dipnoo australiano (*Neoceratodus*). Estudios precedentes habían revelado que *HoxD13* está activo durante el desarrollo del quiridio de los tetrápodos cuando se forman los huesos del carpo y de la mano. El equipo de Johanson demostró que el gen también permanece activo durante la formación de los huesos radiales en la aleta del dipnoo. La diferencia estriba en que, mientras en el desarrollo del quiridio tetrápodo el gen *HoxD13* presenta dos fases de actividad (una inicial vinculada con el desarrollo del brazo y del antebrazo y otra asociada al desarrollo del carpo y de los dedos), en el desarrollo de las aletas del dipnoo parece tener una sola fase, que corresponde al intervalo de actividad en el esbozo del miembro tetrápodo. El trabajo planteaba que los huesos digitales de los tetrápodos procederían de los huesos radiales de la aleta. Pero la muñeca y la mano no habrían surgido como una solución de conjunto, como propusiera Thorogood, puesto que el dipnoo y otros sarcopterigios fósiles y vivientes poseen huesos radiales o carpo, pero no dedos. Tuvo que haber por lo menos dos episodios evolutivos: uno que dio como resultado los dedos y otro los carpos.

Elpistostege viene a complicar aún más la historia. De su existencia se deduce que, en contra del argumento de Johanson, no todos los radiales del dipnoo y de otros sarcopterigios son equivalentes a los dedos: solo los más distales serían los homólogos de las falanges; los radiales proximales lo serían de los huesos de la muñeca (carpianos) y de los huesos largos ubicados en la palma de la mano (metacarpianos). Es más, *Elpistostege* revela otra etapa más en la transición del agua a la tierra firme. Puesto que aparte de conservar los huesos del carpo y de los dedos también conserva los radios de las aletas, pone en evidencia que la pérdida de estos últimos debió de constituir otra fase distinta en la evolución de la mano.

El estado anatómico de las aletas y de los dedos pectorales que hemos descrito en *Elpistostege* nos indica que hemos de seguir ahondando en los mecanismos genéticos y del desarrollo que impulsaron su evolución. A pesar de ello, los numerosos estudios en marcha sobre este esqueleto completo de *Elpistostege* parecen destinados a convertirlo en una verdadera piedra de Rosetta, con la cual se resolverá el enigma de la transformación de las aletas en las extremidades que permitieron a los vertebrados colonizar la tierra firme.

FUENTES: JOHN A. LONG Y «*ELPISTOSTEGE* AND THE ORIGIN OF THE VERTEBRATE HAND», POR RICHARD CLOUTIER ET AL., EN *NATURE* VOL. 579, 18 DE MARZO DE 2020; DAISY CHUNG (*ilustración*)

PARA SABER MÁS

Fish fingers: Digit homologues in *Sarcopterygian fish fins*. Zerina Johanson et al. en *JeZ-B molecular and developmental evolution*, vol. 308b, n.º 6, págs. 757-768, 15 de diciembre de 2007.
***Elpistostege* and the origin of the vertebrate hand.** Richard Cloutier et al. en *Nature*, vol. 579, págs. 549-554, 26 de marzo de 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

Evolución de los tetrápodos. Jennifer A. Clack en *IyC*, febrero de 2006.

Tomás I. Marina es investigador titular del Centro Austral de Investigaciones Científicas del CONICET, en Ushuaia, Argentina. Se interesa por la aplicación de modelos matemáticos a procesos ecológicos marinos.

Vanesa Anabella Salinas es investigadora docente del Instituto de Ciencias de la Universidad Nacional de General Sarmiento. Se centra en el análisis estructural de redes de interacciones tróficas y no tróficas, su respuesta a perturbaciones ambientales y su relación con la estabilidad de los ecosistemas.

Georgina Florencia Cordone es investigadora doctoral del Centro para el Estudio de Sistemas Marinos del CONICET, en Puerto Madryn. Estudia el efecto de distintos factores de estrés en las redes tróficas marinas mediante herramientas de ecología matemática y sistemas complejos.



BIOLOGÍA MARINA

LAS REDES TRÓFICAS DE LA ANTÁRTIDA ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO

El calentamiento global afecta no solo a las especies antárticas en sí mismas, sino también a las complejas relaciones que establecen entre ellas. Conocer el mapa de las interacciones entre depredadores y presas permite detectar efectos sobre especies que se suponen poco afectadas

Tomás I. Marina, Vanesa Anabella Salinas y Georgina Florencia Cordone

RICARDO SAHADE (*fondo marino*); GETTY IMAGES/REDTEA/ISTOCK (*paisaje antártico*)



LOS ECOSISTEMAS ANTÁRTICOS están sufriendo especialmente los efectos del cambio climático. En algunos lugares, el derretimiento de los glaciares provoca el aporte de sedimentos (*gris*) hasta los fondos marinos, donde perjudican a los organismos que allí viven.

DURANTE LOS MESES DE SEPTIEMBRE Y OCTUBRE DE 2008 Y DE MARZO DE 2009, los investigadores de la base antártica argentina Carlini, en la isla 25 de Mayo, observaron asombrados cómo las playas rocosas se cubrían de ejemplares moribundos o muertos de krill, en concreto de la especie *Euphausia superba*, un pequeño crustáceo del plancton que sirve de alimento a ballenas, pingüinos y otras especies de la comunidad marina de la Antártida. Estos diminutos organismos mueren, al parecer, por la obstrucción del sistema intestinal que les causa la ingestión de partículas rocosas procedentes del derretimiento de los glaciares costeros. El krill constituye un recurso energético aprovechado por numerosos depredadores, por lo que cabe preguntarse si estos episodios podrían afectar a las poblaciones de otras especies.

Se considera que las regiones de altas latitudes, en especial el Ártico y la península antártica, son las zonas del planeta donde el cambio climático ha generado los efectos más notables [*véase* «La transformación del Ártico», por Mark Fischetti; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre de 2019]. Los ecosistemas de estas regiones se diferencian de los de ambientes templados y tropicales por sus peculiares condiciones climáticas y de aislamiento geográfico, lo que ha llevado a suponer que están estructurados de forma muy diferente a ellos.

Tradicionalmente, el estudio de los impactos ambientales en los ecosistemas marinos se ha centrado en una población, una especie o un grupo funcional determinados, como los peces, los moluscos o el plancton. Existe una vasta bibliografía científica sobre la respuesta de las especies polares al derretimiento de los glaciares y la reducción del hielo marino; el caso del oso polar *Ursus maritimus*, en el Ártico, o el ya mencionado krill, en la Antártida, constituyen ejemplos paradigmáticos. Pero las alteraciones ambientales no influyen solo en las especies *per se* (en su comportamiento o distribución espacial, por ejemplo), sino también en sus relaciones recíprocas. Y estas no se producen en pares aislados de especies, sino bajo la forma de una red compleja de interacciones. Ello significa que los cambios que se producen en una especie pueden propagarse mucho más allá de aquella con la que se relacionan directamente.

En este sentido, trabajos recientes realizados en los ecosistemas marinos antárticos, como los del mar de Weddell, el mar de Ross, la bahía Prydz (al este de la Antártida) y la caleta Potter (en la península antártica), han demostrado que las relaciones de alimentación constituyen redes intrincadas con cientos de especies e interacciones. Desentrañar estas redes puede ayudar a detectar impactos ambientales en especies que se suponen poco afectadas por ellos, un conocimiento crucial para determinar prioridades de conservación.

En la última década, las investigaciones que han descrito la organización de la comunidad mediante una red de interacción han adquirido una gran relevancia, ya que resulta un enfoque más adecuado e integrador para comprender los efectos de las perturbaciones en los ecosistemas. El análisis de redes complejas se ha aplicado para desentrañar las relaciones tróficas de una comunidad, formadas por depredadores y presas, pero también las relaciones mutualistas, como las que se establecen entre las especies de plantas y polinizadores [*véase* «Redes mutualistas de especies», por Jordi Bascompte y Pedro Jordano; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, septiembre de 2008].

Nuestro grupo de ecología matemática, liderado por Fernando R. Momo, de la Universidad Nacional de General Sarmiento, comenzó a investigar las redes tróficas marinas antárticas y subantárticas hace más de diez años. Lo que nos motivó a trabajar en esta línea de investigación fue el deseo de comprender la relación entre la estructura, el funcionamiento y la estabilidad de los ecosistemas marinos de altas latitudes en el contexto actual de cambio climático. A pesar de que la mayoría de nosotros poseemos formación en los campos de la biología y la ecología, hemos hallado en la matemática herramientas fundamentales para simplificar y entender la inmensa complejidad de los ecosistemas antárticos y subantárticos.

ANALIZAR LAS REDES

Las herramientas que utilizamos para estudiar las redes tróficas antárticas provienen de la teoría de grafos, disciplina de

EN SÍNTESIS

Las relaciones de alimentación entre las especies que habitan regiones marinas de altas latitudes componen una intrincada red de cientos de especies e interacciones.

La red trófica del ecosistema de la caleta Potter, en la península antártica, se compone de más de 90 especies y 300 interacciones tróficas. Dichas interacciones describen el mapa de ruta de los flujos de energía y materia en el ecosistema.

Conocer el mapa de ruta en ecosistemas antárticos afectados por el cambio climático, como el de la caleta Potter, contribuye a detectar impactos sobre especies que se suponen poco afectadas, un conocimiento que resulta crucial para desarrollar planes de conservación.





MORTANDAD MASIVA del krill *Euphausia superba* registrada en la caleta Potter en octubre de 2008, con ejemplares varados sobre la playa. La especie ocupa un lugar importante en la redes tróficas antárticas, por lo que su pérdida, asociada al cambio climático, repercute en el conjunto del ecosistema.

las matemáticas y las ciencias de la computación. Un grafo se define como un conjunto de objetos, o nodos, que se relacionan entre sí a través de enlaces, o aristas. En el caso que nos ocupa, las redes tróficas, los nodos serían las especies, y las aristas, las interacciones entre ellas.

El origen de la teoría de grafos se remonta al siglo XVIII con el problema de los puentes de Königsberg, que consistía en encontrar un camino que recorriera los siete puentes del río Pregel (en la ciudad rusa de Kaliningrado) pasando por cada uno de ellos una sola vez hasta regresar al punto inicial. La imposibilidad de hallar tal camino fue demostrada en 1736 por Leonhard Euler, una resolución que constituyó el primer teorema de la teoría de grafos y el nacimiento de la disciplina en sí misma. Fue el naturalista inglés Charles Elton quien propuso por primera vez en su libro *Animal ecology* (1927) representar las interacciones entre depredadores y presas de una comunidad como un grafo.

Para estudiar las redes tróficas, el primer paso es poder trazarlas, es decir, conocer la dieta de cada una de las especies que habitan en el área de interés. Ello exige recopilar abundantes datos sobre las relaciones entre depredadores y presas en el ecosistema que se investiga. Una vez que se tiene la estructura de la red, se busca describirla a través de sus propiedades emergentes, es decir, aquellas características propias de la red que puedan expresarse a través de números o parámetros. En nuestros estudios, hemos evaluado más de diez características que describen dos propiedades emergentes: la complejidad y la estructura de la red.

En cualquier tipo de red que se trace, ya sea social, informática o ecológica, la complejidad da cuenta del número de elementos que la conforman y de la densidad de las interacciones que se establecen entre ellos. En el caso de las redes tróficas, el número de elementos se traduce en la riqueza o número total de especies (nodos), mientras que las interacciones corresponden a las relaciones entre depredador y presa (aristas), que representan los flujos de energía entre especies. Cuando se analiza la complejidad de la red, pueden determinarse también propiedades como la cantidad de productores primarios (generalmente, organismos fotosintéticos), el número de depredadores superiores y la proporción de especies omnívoras (aquellas que se alimentan de organismos pertenecientes a diferentes niveles tróficos). La proporción de especies omnívoras, en particular, se utiliza como un indicador de la estabilidad de una red trófica, ya que una dieta de este tipo supone más versatilidad para adaptarse a cambios en la disponibilidad de alimento: cuantas más especies posean esta plasticidad en la dieta, menor será la fragilidad de la red.

Otra propiedad emergente importante de las redes es la estructura, que puede describirse a través de diversos parámetros. Uno de los más utilizados es el número mínimo de pasos (aristas) promedio entre dos nodos cualesquiera, que nos da idea de la distancia mínima que debe recorrer la energía para llegar de un punto a otro de la red. También es importante conocer si la red está compartimentada, es decir, si su estructura presenta algunos nodos muy conectados que concentran los caminos de la energía y de los que dependen otros nodos o pequeños grupos de ellos. Las distancias cortas entre nodos (separados por pocas aristas) y un alto grado de compartimentación son características de las redes denominadas «de mundo pequeño».

Este concepto fue planteado a finales de 1960 a raíz de un experimento social realizado por el psicólogo estadounidense Stanley Milgram, en el que se buscaba averiguar la probabilidad de que dos habitantes estadounidenses seleccionados al azar se conocieran. Los resultados indicaron que la distancia promedio medida en pasos entre dos personas cualesquiera era de solo seis grados o pasos (los famosos «seis grados de separación» que teóricamente separan al lector de este artículo con el presidente de su país). El fenómeno de mundo pequeño fue

G. E. AGUIRRE (*izquierda*); GETTY IMAGES/LEAMUS/ISTOCK (*derecha*)

originalmente planteado en redes sociales y luego confirmado en redes neuronales e informáticas [*véase* «La ciencia de redes cumple 20 años», por Alessandro Vespignani; Investigación y Ciencia, diciembre de 2018].

Conocer la estructura resulta esencial para entender el impacto de las perturbaciones en los ecosistemas. Por ejemplo, en aquellos que presentan redes tróficas con cortas distancias entre los nodos, la perturbación se propagará más deprisa y afectará a la mayoría de las especies.

¿De qué manera puede esta aproximación al estudio de redes complejas ayudarnos a entender el funcionamiento de las comunidades ecológicas de altas latitudes?

LAS REDES DE LA ANTÁRTIDA

En nuestros estudios hemos caracterizado diversas redes tróficas marinas antárticas y subantárticas. En los últimos tres años nos hemos centrado en la red de la caleta Potter. Se trata de un fiordo antártico con diversos espacios o hábitats, lo que ha favorecido el desarrollo de una alta riqueza de especies con una amplia variedad de estrategias adaptativas.

Hemos descubierto que la red trófica de la caleta está compuesta por al menos 90 especies, la mayoría de las cuales pertenecen a los siguientes grupos: macroalgas, esponjas de mar, anfípodos (pequeños crustáceos), equinodermos y peces. Dichos grupos son representativos de la biodiversidad que puede hallarse en otros ecosistemas costeros de la península antártica. Del total de especies de la red, el 34 por ciento corresponde a especies basales (productores primarios), el 47 por ciento a especies intermedias (consumidores primarios y secundarios) y el 19 por ciento restante a especies de niveles tróficos altos (depredadores superiores).

En la red se han registrado 300 interacciones entre especies, con un promedio de unas tres interacciones por especie, lo que representa valores relativamente bajos en comparación con otros ecosistemas marinos. Gran parte de la red está controlada por pocas especies que participan en numerosas interacciones. Estas especies con una alta conectividad son el pez de fondo *Notothenia coriiceps*, el equinodermo *Ophionotus victoriae* y el anfípodo *Gondogeneia antarctica*. Como consecuencia, la red puede resultar vulnerable si dichas especies se extinguen.

PIRÁMIDE TRÓFICA



¿Cuán frágil es la red?

La red trófica de la caleta Potter es representativa de la región y su estudio ayuda a entender la respuesta de los ecosistemas antárticos costeros al cambio climático. Presenta varias características de complejidad y estructura (*textos en rojo*) que la convierten en una red vulnerable a las perturbaciones.

Pocas interacciones por especie
En promedio, unas tres

Concentración de especies en los niveles inferiores y superiores
En los niveles inferiores encontramos principalmente macroalgas; en los superiores, sobre todo peces y equinodermos

Poca representación de los niveles intermedios
Incluyen especies omnívoras como gasterópodos y bivalvos

Concentración de la conectividad
Unas pocas especies (*fotografías*) concentran muchas conexiones. Ello las convierte en elementos clave para el ecosistema y su desaparición tendría fuertes repercusiones en la red trófica

Nivel trófico
4
1

Ophionotus victoriae

Notothenia coriiceps

Gondogeneia antarctica

Peces
Anfípodos
Equinodermos
Gasterópodos
Bivalvos
Isópodos
Esponjas de mar
Krill
Algas rojas
Algas pardas
Algas verdes
Diatomeas
Otros

CRISTIAN LAGGER (*O. victoriae*); ESTEBAN BARRERA-ORO (*N. coriiceps*); SANTIAGO R. DOYLE (*G. antarctica*)

En cuanto a la estructura de la red, la distancia mínima que debe recorrer la energía para llegar de un punto a otro es corta, lo que significa que la dispersión de las perturbaciones será rápida en el ecosistema. La red trófica también presenta una baja compartimentación, lo que implica que existen diversos caminos a través de los cuales la energía fluye entre las especies.

Pero ¿cuál es el grado de superposición en el uso de los recursos entre las especies que conforman la red? ¿Cuáles son sus principales canales de energía? ¿Existen vías alternativas de flujo de energía cuando se elimina alguno de esos canales?

Para averiguarlo hemos empleado una herramienta denominada grafo secundario. A partir de una red trófica, que constituye el grafo primario, pueden generarse dos tipos de grafos secundarios: uno de competencia y otro de enemigos comunes. El primero indica el grado de superposición de las dietas de los depredadores y se construye conectando pares de depredadores que tienen presas en común. El grafo de enemigos comunes, por su parte, se construye uniendo aquellas presas que comparten depredadores y es indicativo de los nodos que aportan mayor cantidad de energía al resto de la comunidad.

En la red de la caleta Potter hemos analizado los grafos secundarios de competencia (depredadores que comparten presas) para dos grupos principales de especies: los peces y los anfípodos. Dicho análisis señala a los peces de fondo, que son los organismos con mayor movilidad, como nodos cruciales en el acoplamiento de energía entre los hábitats pelágico (correspondiente a la columna de agua) y bentónico (asociado al fondo marino). También revela la presencia de múltiples canales de energía desde los productores primarios hacia los depredadores superiores; es decir, existen vías alternativas o redundantes de conducción de la energía desde la base de la red de alimentación hasta los niveles más altos.

Los grafos secundarios de depredadores muestran, asimismo, que todos los grupos (en especial, peces y anfípodos) comparten por lo menos una presa, es decir, no se observan líneas energéticas separadas. Sin embargo, dentro de un grupo pueden diferenciarse «gremios» tróficos; por ejemplo, en los anfípodos se distinguen cuatro gremios: herbívoros, detritívoros (que se alimentan de detritos, o materia orgánica en descomposición) y carroñeros, los tres comunicados entre sí, y un grupo adicional no conectado con el resto que son carnívoros. Dada su naturaleza de especies intermediarias, los anfípodos son fundamentales en el traspaso de energía de los niveles tróficos bajos, representados sobre todo por las algas, a los niveles altos, especialmente los peces.

Por último, el grafo secundario de enemigos comunes exhibe una alta densidad de interacciones por especie y refleja la presencia de una gran variedad de flujos de energía, los cuales surgen, principalmente, a partir de los siguientes grupos tróficos: fitoplancton, diatomeas y materia orgánica o detrito. Ello corrobora que no hay una sola vía de energía desde los productores primarios hacia los depredadores superiores, sino que existen múltiples canales alternativos de energía.

LA ESTABILIDAD DE LA RED

Conocer cuáles serán las especies más afectadas por el cambio climático y cuán rápida será la propagación de estas alteraciones en la comunidad es otra de las incógnitas que podemos abordar a través del análisis de redes.

Una de las estrategias consiste en averiguar si la red tiene la propiedad de mundo pequeño. Se sabe que las redes con esta propiedad no solo presentan distancias cortas entre sus nodos, sino que, además, exhiben subgrupos más densamente conectados entre sí que con el resto de la red, en comparación con redes aleatorias de igual complejidad o cantidad de nodos e interacciones. La presencia de este patrón en una red trófica indica una alta resiliencia, lo que significa que podrá recuperarse fácilmente después de una perturbación. Sin embargo, también significa que mostrará una elevada sensibilidad ante la extinción de las especies que están muy conectadas.

Nuestro grupo ha examinado la prevalencia del fenómeno de mundo pequeño en la mayor compilación de redes tróficas marinas analizada hasta la fecha. De un total de 28 redes examinadas, solo cinco exhiben este patrón, y solo una de ellas pertenece a las redes polares y subpolares, la del mar de Weddell. Estos resultados sugieren que esta propiedad estructural no es tan frecuente como se pensaba entre las redes tróficas marinas, y que tal vez no sea un indicador de estabilidad en estos ecosistemas.

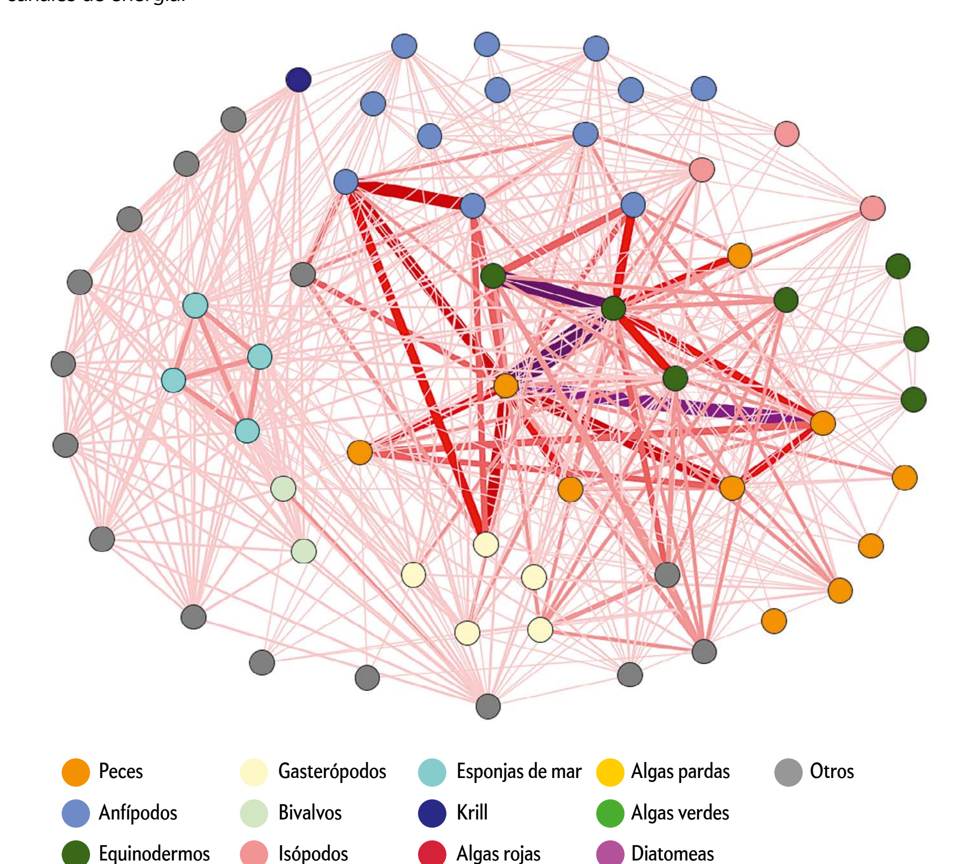
Afortunadamente, hay otras formas de estudiar la estabilidad de las comunidades ante las perturbaciones. Una de ellas consiste en evaluar la respuesta de las redes frente a un impacto ambiental, como el cambio climático, mediante simulaciones de extinciones en el ordenador. La principal ventaja de este método estriba en la posibilidad de conocer los efectos no solo en las especies alteradas directamente, sino también en las que se relacionan con ellas en la red. Nuestros análisis incorporan además umbrales de extinción secundaria, que representan la mínima proporción de presas que un depredador necesita para sobrevivir. A medida que el umbral de extinción aumenta, la probabilidad de que el depredador se extinga también se incrementa, ya que necesita la mayoría de sus presas para sobrevivir.

Con esta estrategia exploramos qué sucedería si los cambios ambientales produjesen la extinción local de distintas macroalgas, un grupo de especies importantes en las bahías y fiordos de la península antártica y las áreas subantárticas: no solo son productores primarios (obtienen la energía a través de la fotosíntesis), sino que también ofrecen refugio y alimentación a invertebrados y peces, que las consumen vivas o en forma de detritos. Las macroalgas se ven especialmente amenazadas por el cambio climático porque son incapaces de migrar ante condiciones ambientales desfavorables.

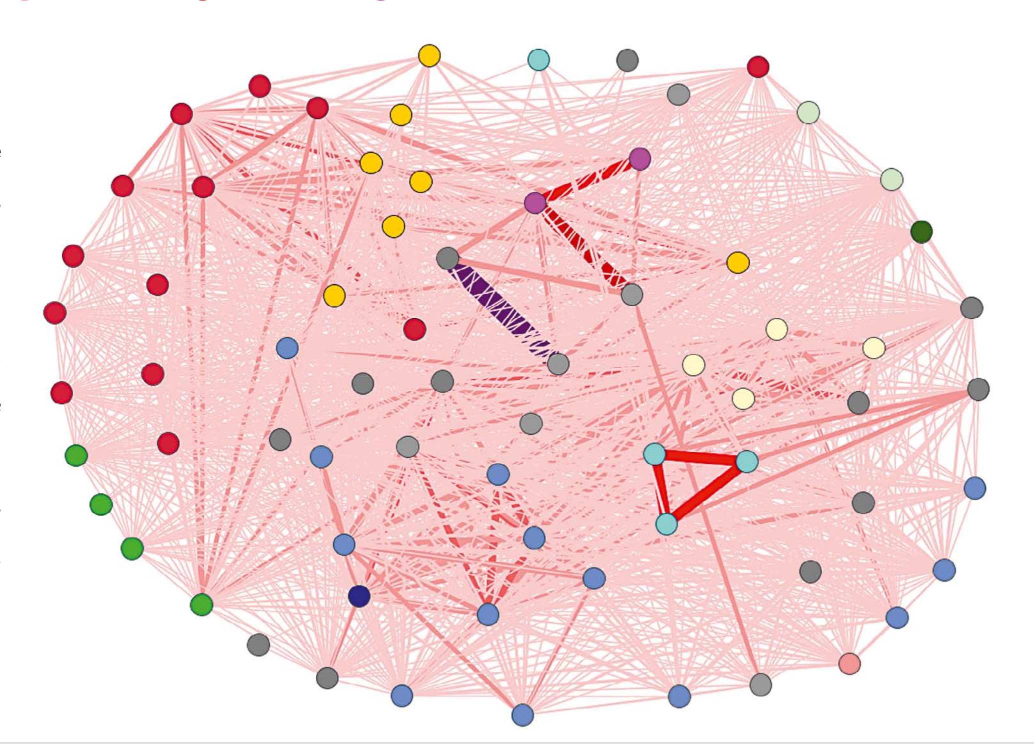
Las simulaciones han revelado que la red trófica de la caleta Potter se muestra robusta a las extinciones locales de pocas especies de macroalgas, aunque podría colapsar si los depredadores perdieran al menos el 25 por ciento de sus presas. Estos resultados son notablemente diferentes de los obtenidos por otros investigadores, en los cuales una reducción de un 10 por ciento de las presas de un depredador desencadena un desproporcionado aumento de extinciones secundarias en la red. La robustez del ecosistema de la caleta ante las extinciones de macroalgas

Redes secundarias de depredadores y presas

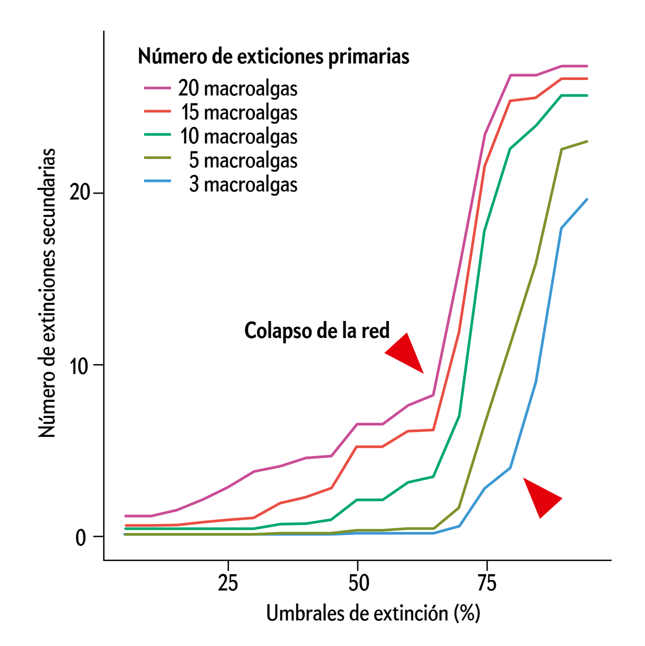
¿Cómo se relacionan los depredadores entre sí? ¿Y las presas? El estudio de las redes secundarias de estos grupos de especies por separado ofrece información relevante sobre la dinámica y la funcionalidad de los ecosistemas, así como sobre sus principales canales de energía.



El análisis del **grafo secundario de los depredadores** que comparten presas en la caleta Potter muestra una conectividad elevada, con varios depredadores que comparten las mismas presas (cuanto más gruesa y oscura es la línea, mayor número de presas comparten). Algunas especies de peces de fondo (*naranja*), equinodermos (*verde oscuro*) y anfípodos (*azul*) compiten intensamente por los mismos recursos. Los peces, los organismos más móviles, son nodos cruciales en el acoplamiento de energía desde los fondos hacia la columna de agua.



El **grafo secundario de presas** que comparten depredadores (enemigos comunes) pone de manifiesto su hiperconectividad, lo que implica que la mayoría de ellas comparten al menos un depredador. El fitoplancton, la materia orgánica (*gris*) y las diatomeas (*lila*) se establecen como canales alternativos de energía desde los niveles tróficos bajos hasta los niveles altos, lo que ofrece estabilidad al ecosistema.



LA RESILIENCIA DE LA RED: Las simulaciones por ordenador para la red de la caleta Potter permiten conocer el efecto de la extinción de un número creciente de especies de macroalgas (extinciones primarias) sobre el número de extinciones secundarias de otras especies. Para estas últimas, se prevén distintos umbrales de extinción (el porcentaje de presas mínimo que necesitan para sobrevivir). El colapso de la red se produce cuando observamos un salto abrupto en el número de extinciones secundarias (*flechas*). La red colapsa a partir de un umbral de extinción del 75 por ciento (es decir, cuando desaparecen el 25 por ciento de las presas).

se debe a los omnívoros y a la redundancia de la red, esto es, la superposición de roles funcionales en múltiples especies de la comunidad (aspecto que también se puso de manifiesto en el grafo secundario de enemigos comunes, el cual presenta en promedio una gran cantidad de interacciones por especie).

MÁS ALLÁ DEL ANÁLISIS DE REDES

A pesar de que en las últimas décadas se ha avanzado mucho en el desarrollo de herramientas analíticas para las redes ecológicas complejas, todavía hay aspectos que necesitan una mayor atención. Uno de ellos es la caracterización de la variación temporal y espacial de las comunidades biológicas y de sus flujos de energía. Esas variaciones desempeñan un papel fundamental en la composición de especies de una comunidad y en la intensidad de las interacciones. La variación temporal viene definida sobre todo por la estacionalidad, que es muy marcada, con cambios notables a lo largo del año en la temperatura del agua y del aire, las horas de luz y la extensión del hielo marino.

La heterogeneidad espacial ejerce también una influencia importante. En la caleta Potter, por ejemplo, existen fuertes variaciones en los tipos de fondo, y las especies clave que habitan los fondos blandos (donde predominan los sedimentos) son distintas de las que medran en los fondos duros (donde predomina la roca). El grupo de Ricardo Sahade, del Instituto de Diversidad y Ecología Animal de la Universidad Nacional de Córdoba, en Argentina, demostró que el derretimiento glaciar en los fiordos antárticos, que se traduce en un mayor aporte de sedimentos, provoca un cambio drástico en la composición y abundancia de las especies filtradoras (las que filtran el agua para retener las partículas orgánicas presentes en ella). Hemos incorporado esa heterogeneidad a nuestro análisis y los resultados preliminares sugieren que existe un importante subsidio energético hacia los fondos blandos por descomposición de las macroalgas desprendidas de los fondos duros, proceso que estaría actuando como un factor estabilizante en el sistema. Por otro lado, la dominancia de interacciones débiles en invierno y los pulsos de materia y energía en verano también actuarían como factores de estabilidad.

Las heterogeneidades estacional y espacial deberán tenerse en cuenta a la hora de evaluar los efectos del cambio climático. Estudios recientes indican que uno de los efectos del aumento de la temperatura del agua en los ecosistemas antárticos es la disminución en la biomasa de krill y el aumento de las salpas (organismos invertebrados gelatinosos menos nutritivos que el krill).

Las mortandades masivas de krill registradas hace casi una década en las costas de la caleta Potter trajeron consecuencias para el resto de las especies que viven allí. En aquel entonces podíamos imaginar que este evento afectaría sobre todo a los organismos que se alimentan del krill. Ahora, gracias a las herramientas de análisis de redes tróficas, conocemos el mapa mediante el cual esta perturbación pudo haberse propagado y sabemos cuáles fueron realmente los canales de energía más afectados. Es probable que la presencia de especies omnívoras y de vías alternativas de flujo de energía evitaran un cambio profundo en la estructura de la comunidad. Sin embargo, resta conocer si la ausencia del pulso de energía del krill en verano tiene consecuencias para el funcionamiento del ecosistema en invierno, momento en el cual los flujos de energía se reducen considerablemente.

Es aquí donde el análisis de redes tróficas surge como un instrumento adecuado para predecir las consecuencias de los cambios ambientales. Seguramente el desarrollo de nuevas herramientas computacionales y las investigaciones de campo nos permitirán avanzar hacia una comprensión cada vez más completa del funcionamiento de las comunidades ecológicas y sus redes complejas de interacciones. Muchas aplicaciones de las redes tróficas aún están por explorarse. Invitamos a las mentes jóvenes y al público en general a acompañarnos en este apasionante viaje por el mundo de las redes tróficas.

PARA SABER MÁS

Ecological networks: Linking structure to dynamics in food webs. Mercedes Pascual y Jennifer A. Dunne. Oxford University Press, 2006.
Ecological networks in a changing climate. Guy Woodward et al. en *Advances in Ecological Research*, vol. 42, págs. 71-138, diciembre de 2010.
The food web of Potter Cove (Antarctica): Complexity, structure and function. Tomás I. Marina et al. en *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, vol. 200, págs. 141-151, enero de 2018.
Architecture of marine food webs: To be or not be a «small-world». Tomás I. Marina et al. en *PLoS One*, vol. 13, n.º 5, e0198217, mayo de 2018.
Effects of macroalgae loss in an Antarctic marine food web: Applying extinction thresholds to food web studies. Georgina Cordone et al. en *PeerJ*, vol. 6, e5531, septiembre de 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

Redes tróficas marinas. Enrico L. Rezende, Eva M. Albert y Miguel A. Fortuna en *IyC*, agosto de 2011.
La red que desaparece. John Matson en *IyC*, agosto de 2012.
Ecosistemas al borde del colapso. Carl Zimmer en *IyC*, diciembre de 2012.
Redes tróficas reestructuradas. Julia L. Blanchard en *IyC*, junio de 2016.
El bentos antártico, afectado por el cambio climático. Ricardo Sahade en *IyC*, julio de 2016.

por Robert Gast

Retina luminosa

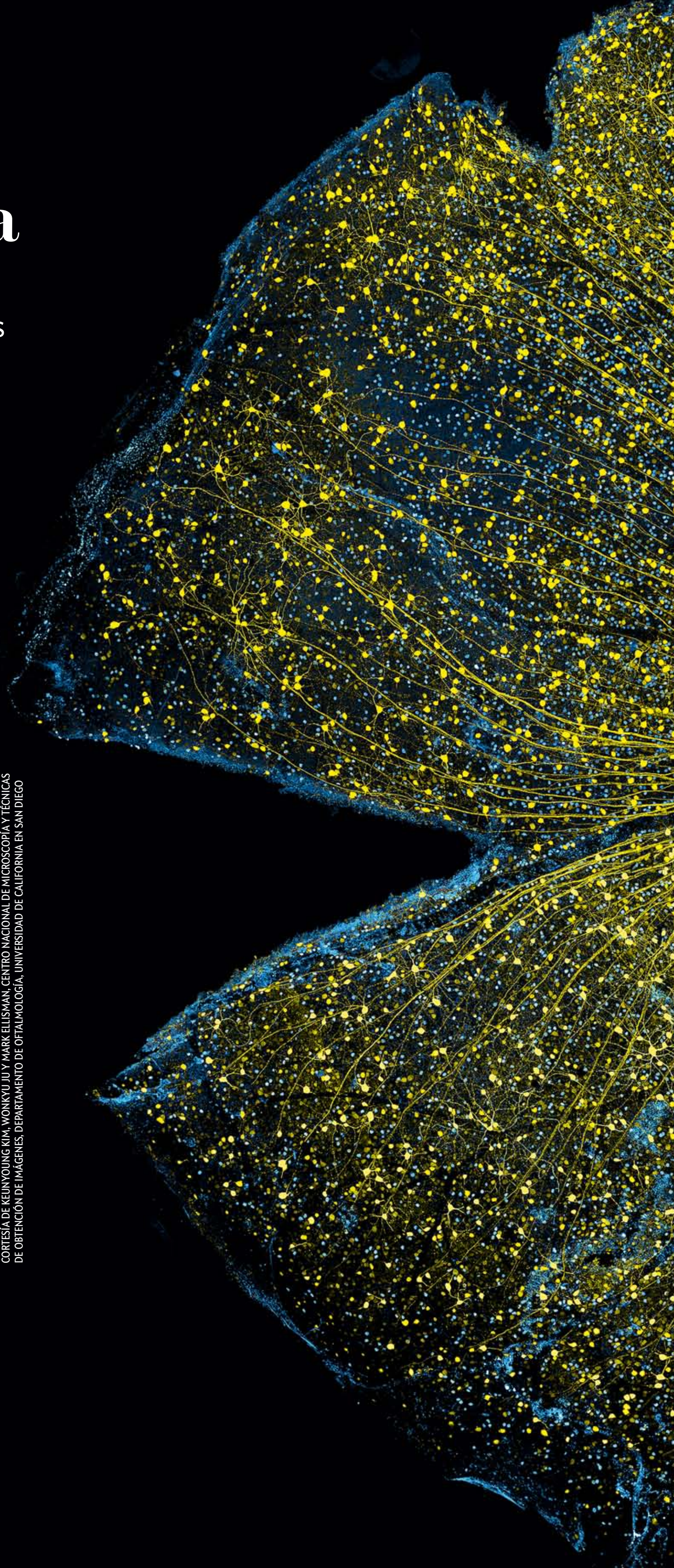
La metilación del gen *ELOVL2* parece relacionarse con ciertas enfermedades oculares asociadas a la edad

Esta flor tan luminosa es en realidad la retina de un ratón, cuyas proteínas emiten fluorescencia. El grupo de Dorota Skowronska-Krawczyk, de la Universidad de California en San Diego, ha obtenido esta imagen microscópica como parte de un estudio sobre un gen llamado *ELOVL2*. Este contiene las instrucciones para fabricar una proteína que produce ácidos grasos de cadena larga. Las células necesitan estas moléculas para llevar a cabo múltiples funciones biológicas importantes. *ELOVL2* se considera también un posible marcador de la edad biológica, incluso en la especie humana.

Al parecer, este gen desempeña un papel esencial en el envejecimiento del ojo y podría relacionarse con enfermedades oculares asociadas a la edad, como la degeneración macular, comentan ahora los investigadores en la revista *Aging Cell*. Al menos, eso se desprende de su vínculo con la metilación del ADN, un proceso que modifica el material genético de las células; en los ratones, este proceso parece reforzarse conforme va reduciéndose la síntesis de la proteína codificada por *ELOVL2* con el paso del tiempo.

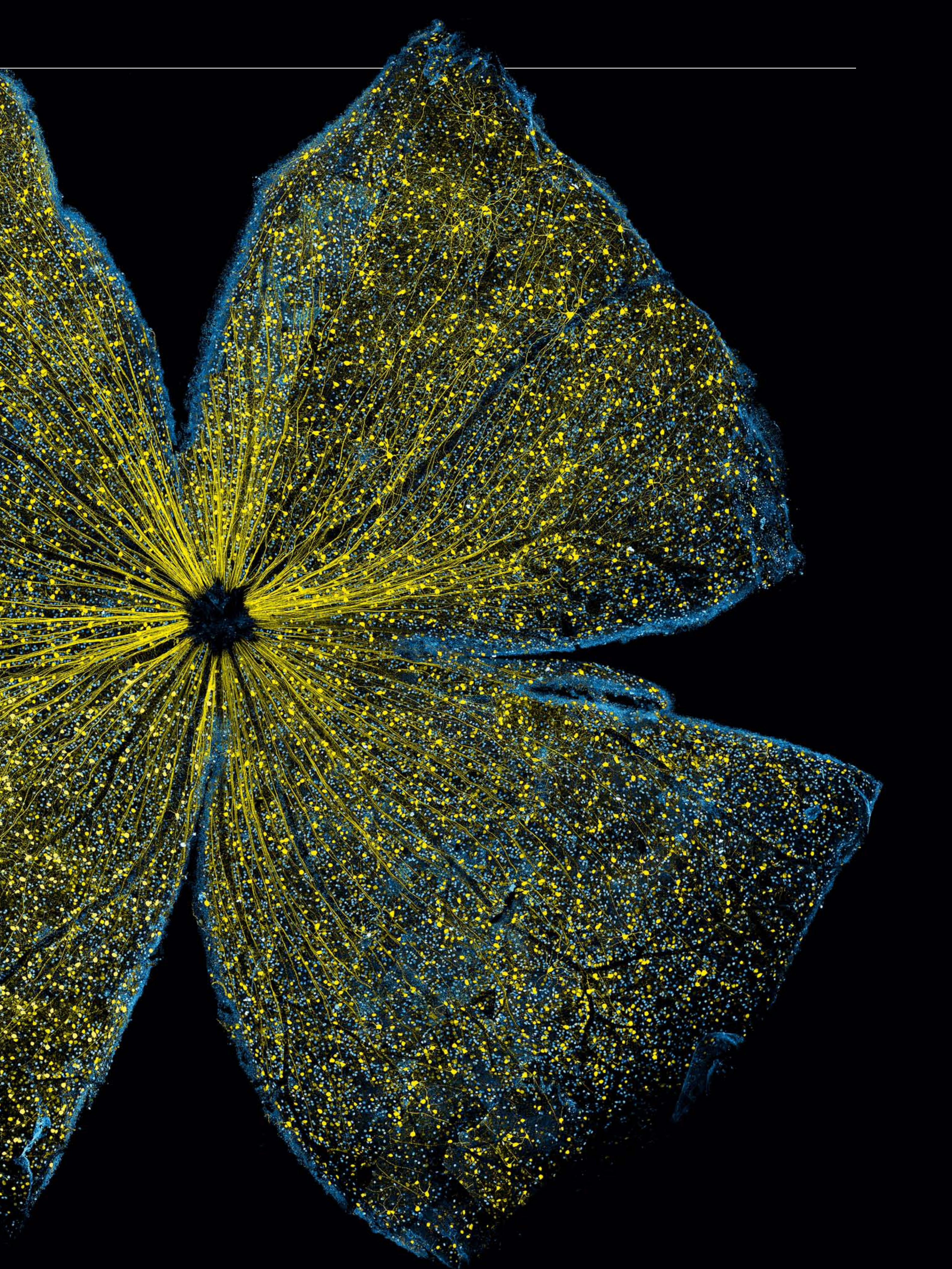
El grupo de Skowronska-Krawczyk logró revertir la metilación del gen en cuatro ratones de laboratorio y, en consecuencia, frenó el deterioro de la agudeza visual asociado al envejecimiento. El equipo cree haber demostrado que el gen *ELOVL2* actúa como manecilla de nuestro reloj biológico. Los investigadores especulan con la posibilidad de que otros procesos relacionados con el envejecimiento se relacionen con la expresión del gen y han solicitado una patente de esta técnica, que pretenden comercializar a través de una empresa fundada en 2019.

—*Robert Gast*



CORTESÍA DE KEUNYOUNG KIM, WONKYU JU Y MARK ELLISMAN, CENTRO NACIONAL DE MICROSCOPÍA Y TÉCNICAS DE OBTENCIÓN DE IMÁGENES, DEPARTAMENTO DE OFTALMOLOGÍA, UNIVERSIDAD DE CALIFORNIA EN SAN DIEGO

Si eres investigador en el campo de las ciencias de la vida y la naturaleza, y tienes buenas fotografías que ilustren algún fenómeno de interés, te invitamos a participar en esta sección. Más información en **www.investigacionyciencia.es/decerca**



por Oliver Hochadel

Oliver Hochadel es historiador de la ciencia en la Institución Milá y Fontanals del CSIC, en Barcelona.



Mirar a los elefantes e ignorar los carteles

¿Qué papel ha desempeñado el público en la evolución de los zoológicos?

«Prohibido dar de comer a los animales». Desde hace más de cien años, mensajes como este, en colores llamativos y signos de exclamación, intentan regular la relación de los visitantes del zoo con los animales. El caso omiso que suele hacerse de tales advertencias nos enseña dos cosas importantes: que los visitantes buscan el contacto directo con los animales y que el zoo no ha conseguido educar del todo al público.

Los parques zoológicos modernos son un producto del siglo XIX. Las primeras instituciones con animales exóticos vivos exhibidos permanentemente en espacios abiertos al público se inauguraron en París (1793), Londres (1828), Dublín (1831), Ámsterdam (1838), Amberes (1843) y Berlín (1844). En Madrid, la antigua Casa de Fieras fue expuesta a partir de 1868 en el Parque del Buen Retiro. El zoo de Barcelona no se fundó hasta 1892 en el Parque de la Ciudadela.

La relación entre el zoo, sus animales y el público tiene, pues, una larga historia, y supone un reto mayúsculo para el historiador. Mientras que los parques zoológicos han generado numerosas fuentes, contamos con muy pocos testimonios de los visitantes, apenas una entrada en un diario o una carta. Reconstruir sus experiencias personales al admirar tigres, rinocerontes o tortugas gigantes parece casi imposible.

Un recurso es la mirada indirecta. ¿Cómo han imaginado al público los responsables del zoo? Las guías de los zoológicos y los artículos de prensa dibujan dos tipos de visitantes. El visitante ideal tiene un verdadero interés por los animales y acude al zoo para aprender sobre ellos, especialmente sobre la fauna exótica. Por supuesto, muestra el máximo respeto por los animales. Pero no es el más común. La pregunta de si el público aprende algo, suscita en un cuidador o en una directora de zoo una sonrisa un tanto amarga. Las fuentes siempre se lamentan de que los visitantes casi nunca leen los rótulos informativos sobre cada animal.



¿EL INICIO DE UNA HERMOSA AMISTAD? Un elefante indio y los visitantes del zoo de Viena. Postal de alrededor de 1900.

ARCHIVO DEL ZOO DE VIENA EN SCHÖNBRUNN

Moral y política del zoo

Esto nos lleva al segundo tipo de visitante, el real, el que solo quiere divertirse. Ignorando los carteles que lo prohíben, da de comer a los animales e incluso llega a torturarlos. Con motivo de la inauguración del zoo de Barcelona, el 24 de septiembre de 1892, los diarios dieron cuenta de visitantes maleducados que intentaban cubrir al animal estrella, el elefante Avi, no solo con panecillos sino también con cigarrillos encendidos y trozos de vidrio. Cuenta la leyenda que Avi se vengaba rociando con su trompa a los malhechores. Los mismos periódicos hablaban también del envenenamiento de flamencos y de un cisne blanco.

«¡Quien trata mal a un animal, dentro o fuera del zoo, es una mala persona!» La prensa conservadora, como el *Diario de Barcelona* o *La Vanguardia Española*, moralizaba a propósito de esos comportamientos. El diario republicano *El Diluvio,* en cambio, defendía al público y criticaba a la gerencia por el elevado coste del zoo. Este contraste refleja bien la tensa situación política y social en la Cataluña del cambio de siglo. ¿Había que desconfiar y controlar al público, es decir, las clases bajas? ¿O más bien se trataba de controlar a las instituciones?

El zoo del siglo XIX, como el museo o el parque urbano, se puede considerar una institución disciplinaria. El visitante no malgastaba su tiempo (ni su dinero) en tabernas u otros lugares de dudosa reputación. Además, debía cumplir las normas

sobre cómo comportarse y vestirse, y seguir un recorrido fijado, que condicionaba su mirada. Sin embargo, los intentos por controlar y elevar el sentido moral del visitante tuvieron un éxito limitado. El público tenía su propia agenda, porque su papel en el zoo estaba lejos de ser pasivo.

El poder del público

En el siglo XIX, el sentido de esta nueva institución que era el zoo no estaba aún bien definido. ¿Para qué servía exactamente? ¿Para la investigación científica sobre la aclimatación y la reproducción? ¿Para la cría de animales exóticos con fines comerciales? ¿Para educar al gran público sobre el reino animal? ¿O bien —*horribile dictu*— para divertirse? No había una única respuesta. El zoo ha sido desde sus inicios una institución híbrida, en permanente transformación. En la medida en que dependía de los ingresos por las entradas, tenía que adaptarse a los deseos de los visitantes. Los zoos acogieron granjas, conciertos y todo tipo de espectáculos, incluida la exhibición de seres humanos «exóticos». Hacia 1880, el de Berlín disponía de restaurantes capaces de acoger a miles de comensales. Los animales también «trabajaban». Los chimpancés demostraban sencillos trucos, las avestruces tiraban de pequeños coches, los elefantes llevaban niños. Los historiadores coinciden en que el zoo del último tercio del siglo XIX era un espacio para las masas. En cuanto a sus objetivos, pues, el ocio se impuso a la ciencia. El zoo se democratizó contra su propia voluntad.

La transformación arquitectónica del zoo en la primera década del siglo XX no es comprensible sin tener en cuenta los deseos visuales del público. El empresario de animales Carl Hagenbeck abrió en 1907 un zoo privado en Stellingen, en las afueras de Hamburgo. Gracias a fosos ocultos y otros elementos de construcción que confinaban sin necesidad de vallas o rejas, los animales parecían estar en libertad y las especies se mezclaban en los distintos recintos. La gente disfrutaba mucho de esta ilusión. El modelo se impuso en casi todos los zoos del mundo. Llegó a Barcelona en 1963 con la Gran Fauna Africana, una superficie extensa que albergaba media docena de especies. Los panoramas de Hagenbeck aportaban a los animales exóticos un ambiente supuestamente más natural (con elementos artificiales), pero la motivación principal de la nueva arquitectura era favorecer el consumo visual de los visitantes.

¿Arca o prisión?

Por el contrario, el bienestar de leones o monos en cautividad no fue un criterio relevante hasta bien entrado el siglo XX. Solo cobró importancia tras la Segunda Guerra Mundial, y especialmente a partir de los años setenta. El zoo ya no parecía un paraíso para animales que, a diferencia de las personas pobres de la ciudad, nunca padecían hambre (una broma de mal gusto contada a menudo a principios de siglo). Los grupos animalistas empezaron a denunciar a los zoos como prisiones que habría que reformar, o incluso cerrar.

Al ver su legitimidad cuestionada, el zoo tendió a definirse cada vez más como una moderna Arca de Noé. La conservación de especies en peligro de extinción se convirtió en un argumento clave. Los rótulos de las jaulas advertían al visitante del grado de amenaza al que estaba sometida cada especie.

Aun así, las críticas no cesaron. Para una parte del público, cuya voz se escucha hoy con fuerza, la misma institución del zoo ha perdido su razón de ser. El 23 de junio de 2016, tras multitudinarias protestas, el zoo de Buenos Aires cerró para convertirse en un «eco-parque» en el que los animales estaban protegidos de la vista de los pocos visitantes que acudían al centro. En Barcelona se discute desde hace años sobre el futuro del zoo urbano. En mayo de 2019, el Ayuntamiento aprobó una ordenanza con el objetivo de transformarlo por completo. Se mantendrán solo especies mediterráneas y en peligro de extinción, que entren en planes de reintroducción en la naturaleza. El resto se trasladará a santuarios de animales o serán cuidados hasta su muerte.

Habrá que ver cómo funcionará este esquema y si el público conseguirá acabar con una institución a la que hizo grande. Lo cierto es que a lo largo de casi dos siglos, el zoo moderno ha evolucionado junto con su público, en una historia dialéctica y cruzada.

Naturalistas y niños

Para acabar, conviene reconocer que hablar del «público» supone una simplificación problemática, porque nunca fue homogéneo. Por ello sería mejor hablar de «públicos». En la segunda mitad del siglo XIX, cuando la función del zoo no estaba bien definida, había visitantes muy diversos. Los naturalistas acudían al zoo para observar animales que no podían ver salvo en un largo viaje a otros continentes. Pese a que el zoo no era un espacio para la investigación sistemática, se hicieron numerosas observaciones e incluso experimentos.

El caso más conocido es el de Charles Darwin, asiduo visitante del zoo de Londres. En 1838 observó el comportamiento de un joven orangután y destacó su parecido con el comportamiento humano (21 años antes de la publicación de *El origen de las especies*). Más tarde, y con la ayuda de cuidadores, llevó a cabo experimentos con el águila volatinera y el búho nival, que utilizó para completar su teoría de la evolución.

Darwin también encargó a artistas como Joseph Wolf dibujos de monos que captaran la expresión de sus emociones. De hecho, dibujantes y pintores frecuentaban el zoo, donde podían observar criaturas exóticas cerca de casa. Hacia 1900 se bromeaba con que los artistas se peleaban por el mejor sitio ante la jaula de los leones.

Escritores como el alemán Rainer Maria Rilke, en un poema sobre la pantera enjaulada, o el argentino Julio Cortázar, en un cuento en el que se convertía en un ajolote, se inspiraron en el Jardín de las Plantas, el zoo de París.

Los niños fueron asimismo un público clave. Desde los inicios, animaron a sus padres a llevarlos al zoo. Según algunos historiadores, la antropomorfización de animales exóticos por parte de los niños tuvo un impacto enorme en la industria cultural, desde la producción de peluches hasta las películas de Disney. Los animales reales se convirtieron en animales imaginarios.

La composición del público ha cambiado mucho a lo largo del último siglo, pero la diversidad se ha mantenido. El fotógrafo naturalista, la estudiante de biología, el niño entusiasmado, la abuela que visita a los hipopótamos cada día, el animalista que busca pruebas del maltrato y, claro, el padre incorregible que da palomitas a la jirafa para impresionar a su familia, todos se encuentran en el zoo. IyC

PARA SABER MÁS

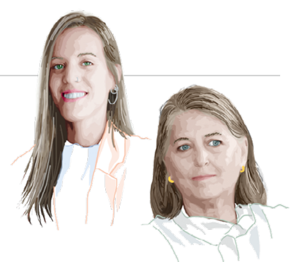
Savages and beasts. The birth of the modern zoo. Nigel Rothfels. Johns Hopkins University Press, 2002.

Künstliche Tiere. Zoologische Gärten und urbane Moderne. Christina Wessely. Kadmos, 2008.

De les gàbies als espais oberts. Història i futur del zoo de Barcelona. Miquel Carandell. Alpina, 2018.

por Marta Consuegra y María Casado

Marta Consuegra es investigadora del Observatorio de Bioética y Derecho (OBD) de la Universidad de Barcelona y profesora del máster de Comunicación Especializada en dicha universidad. **María Casado** es directora e investigadora principal del OBD, titular de la cátedra UNESCO de bioética y catedrática de filosofía del derecho de la Universidad de Barcelona.



El triaje de los pacientes de COVID-19

La edad no debe ser el primer criterio para el ingreso de los enfermos en la UCI

En los peores meses de la pandemia, el personal sanitario ha tenido que hacer frente a una de las situaciones clínicas más dramáticas: el triaje de los pacientes críticos para su ingreso en las Unidades de Cuidados Intensivos (UCI). La falta de equipos de protección individual, de tratamientos de soporte vital, de camas hospitalarias y, sobre todo, de personal sanitario, en especial de intensivistas, han obligado a optimizar los recursos y a priorizar la atención de las personas afectadas. Ante esta situación de emergencia, la mayoría de los comités de ética asistencial de los hospitales, las sociedades médicas, los colegios y algunas entidades científicas, como el Observatorio de Bioética y Derecho (OBD), han emitido una serie de criterios médicos para facilitar una toma de decisiones homogénea. Estas recomendaciones han llegado a los hospitales en forma de pautas y protocolos, charlas, seminarios y formaciones específicas para los profesionales sanitarios.

En el momento de mayor colapso sanitario, agotadas las opciones como la transferencia de pacientes a otros centros o la adquisición de nuevos recursos materiales, el personal sanitario se ha visto obligado a escoger entre los pacientes que debían ser atendidos, una responsabilidad con excesiva carga moral. En este contexto, desde el OBD hemos propuesto que se actúe con anticipación y de forma colegiada siguiendo unas pautas claras y uniformes. No obstante, dichas indicaciones deben adaptarse a cada paciente y supeditarse a un criterio médico compartido.

Una de las medidas que hemos planteado es hacer una valoración precoz y proactiva de los enfermos que cumplan las condiciones para ingresar en la UCI. Esta evaluación incluye su situación funcional y cognitiva y la presencia de comorbilidades, es decir, enfermedades adicionales previas. En este último caso, además, es preciso valorar si están en fase avanzada o terminal. Ante dichas circunstancias, se limita tanto el ingreso en la UCI como otras medidas terapéuticas. Por último, el tratamiento de soporte vital debe estar condicionado por la evolución del paciente y, si el progreso es desfavorable, debe ser sustituido por medidas de confort y alivio de los síntomas.

Uno de los aspectos más sensibles en relación con el triaje de los pacientes ha sido y es, sin duda, el peso de la edad como criterio determinante. Como pauta general, en los enfermos mayores de ochenta años con comorbilidades se descarta la ventilación mecánica con intubación o la oxigenoterapia de alto flujo. En su lugar, se propone el uso de soporte vital no invasivo, como la ventilación con presión positiva. Ello se fundamenta en el hecho de que el envejecimiento se asocia a enfermedades crónicas, a una menor probabilidad de supervivencia y a una mayor presencia de discapacidades. Es imprescindible que, en cada paciente, se valore el beneficio potencial de los tratamientos teniendo en cuenta la existencia de patologías asociadas, inevitablemente, más presentes a mayor edad. Aquí es donde debe intervenir el juicio clínico para discernir entre una paciente de ochenta años con una calidad de vida excelente y sin comorbilidades avanzadas de otra persona de menor edad con peor pronóstico y que probablemente responderá mal al soporte vital. La realidad es que no todos los enfermos se benefician por igual de los tratamientos especializados, y en un momento de máxima escasez, hay que optimizar el rendimiento sanitario y minimizar los esfuerzos estériles. En cualquier caso, siempre debe suministrarse asistencia a todas las personas que la soliciten y adecuarla a las necesidades de cada paciente y al grado de saturación de los servicios sanitarios. Abandonar los cuidados de un paciente constituye una agresión contra la dignidad humana.



EL DESEQUILIBRIO entre la demanda sanitaria y los recursos disponibles ha hecho ineludible el triaje de los pacientes críticos.

Es en las situaciones de emergencia cuando el criterio clínico cobra mayor importancia. Este debe ser consensuado y recoger diferentes perspectivas, tanto la científico-técnica como la ética. A este respecto, el OBD propone la intervención de un comité de triaje formado como mínimo por un miembro del comité de ética asistencial del hospital, un médico intensivista y, en la medida de lo posible, el resto del equipo de la UCI. En España, la mayoría de los hospitales cuentan con esos comités; de no ser así, pueden asesorarse con alguno de referencia de otro hospital más grande. El objetivo de los equipos interdisciplinares es reducir al mínimo los sesgos ligados a interpretaciones y valoraciones individuales y que los médicos no asuman solos la carga emocional de las decisiones.

En un escenario de emergencia excepcional como el actual, las necesidades de salud pública pueden entrañar una limitación de los derechos individuales en el marco de la atención sanitaria. Ante esta situación, es imprescindible que se establezcan unos criterios de ingreso claros y homogéneos, que deberán ser comunicados tanto a familiares como a pacientes. De este modo se cumplirá con el principio de transparencia y se evitará la pérdida de confianza en el sistema de salud.


100

CAMBIO CLIMÁTICO

EL PRECIO DE CONTAMINAR

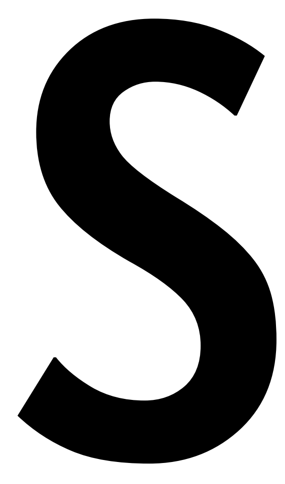
Una combinación de modelos matemáticos y decisiones políticas puede determinar un impuesto viable para reducir las emisiones de CO_2

Gilbert E. Metcalf

Ilustraciones de Katie Edwards

Gilbert E. Metcalf es profesor de economía en la Universidad Tufts e investigador asociado de la Oficina Nacional de Investigación Económica de EE.UU. Su especialidad es la economía del clima y es autor de *Paying for pollution: Why a carbon tax is good for America* (Oxford University Press, 2019).





SI LE PREGUNTAMOS A UN ECONOMISTA CÓMO COMBATIR EL CAMBIO CLIMÁTICO, DIRÁ que la estrategia más eficaz es poner precio a las emisiones de gases de efecto invernadero, preferiblemente a través de un impuesto sobre el carbono. Esta respuesta refleja un principio económico básico: los residuos generados en cualquier ámbito conllevan un coste que hay que sufragar. Pagamos por deshacernos de nuestra basura o depurar las aguas residuales, y también deberíamos pagar por el dióxido de carbono que producimos en actividades como la quema de combustibles fósiles.

Podemos poner precio a la contaminación por medio de un impuesto sobre el carbono o de un programa de «topes y transacciones», como el que han adoptado los países europeos para centrales eléctricas y fábricas. Este sistema fija un límite de emisiones totales, de modo que a algunas empresas les resulta rentable contaminar menos y vender sus derechos de emisión, para que otras firmas puedan seguir liberando gases sin que el conjunto de participantes sobrepase el máximo establecido. Pero los precios de estos acuerdos han demostrado ser volátiles, así que se requiere mucha supervisión para evitar problemas.

¿Por qué molestarse? Un impuesto sobre el carbono hace que el precio de las emisiones resulte más diáfano, un aspecto que valora la comunidad empresarial. Y muchos países ya cuentan con un sistema tributario bien desarrollado y que recauda sin contratiempos impuestos especiales sobre diversos combustibles fósiles.

Ese tipo de razones han llevado a economistas como Gregory Mankiw, que presidió el Consejo de Asesores Económicos de la Casa Blanca durante el mandato de George W. Bush, a abogar de manera decidida por un gravamen sobre el carbono. El Consejo de Liderazgo Climático, un instituto de política internacional, publicó en 2019 un manifiesto que esgrime que «un impuesto al carbono constituye el instrumento más rentable para reducir las emisiones de carbono a la escala y velocidad necesarias». En el momento de redactar este artículo, ya lo han firmado 3589 economistas, incluidos los tres expresidentes vivos de la Reserva Federal, 27 premios Nobel y 15 expresidentes del Consejo de Asesores Económicos. La forma en que Estados Unidos aborda el cambio climático se ha convertido en un eje principal de la campaña presidencial, y se han presentado ocho proyectos de ley en el Congreso (incluido uno con 80 proponentes) para poner precio a la contaminación por carbono, en siete de ellos mediante un tributo.

Aun así, establecer un impuesto sobre el carbono requerirá un gran impulso político. Si se presenta la oportunidad, climatólogos, economistas y políticos deben estar preparados para aprovecharla. Tendrán que hacerlo bien a la primera. Y tendrán que justificar la elección de un tipo impositivo concreto.

Determinar ese tipo parece sencillo: el precio de una tonelada de CO_2 debe equivaler a los daños que produce su liberación. Pero ¿cómo los evaluamos?

LOS PERJUICIOS DE LAS EMISIONES

Los economistas suelen calcular los daños climáticos con modelos de evaluación integrada (MEI), complejos modelos computacionales que reflejan las interacciones entre la economía y el clima. Emplean una serie de ecuaciones que caracterizan la economía mundial, la circulación global de las emisiones de CO_2 generadas

EN SÍNTESIS

Los economistas coinciden en que la forma más eficaz de reducir las emisiones de dióxido de carbono es mediante un impuesto. Los que han aprobado algunos países van desde menos de 1 dólar hasta 121 dólares por tonelada de CO_2.

La clave para fijar un tipo impositivo es calcular el coste social del carbono, que depende de la tasa de descuento aplicada a las inversiones, el daño que las emisiones infligirán a la economía y el riesgo de que ocurran desastres.

Los responsables políticos pueden ver un impuesto sobre el carbono como un instrumento para reducir las emisiones, generar ingresos o protegernos de futuras catástrofes.

MODELOS DE EVALUACIÓN INTEGRADA

Daños a la economía

Los economistas emplean modelos de evaluación integrada a fin de hallar un tipo impositivo óptimo para gravar el carbono: un precio por cada tonelada de dióxido de carbono emitido a la atmósfera. Para calcular las interacciones entre el clima y la economía, los modelos caracterizan esta, la circulación mundial de las emisiones generadas por la actividad económica y el impacto económico del aumento de la temperatura en la atmósfera y en la capa superior del océano. Los expertos también tienen en cuenta las incertidumbres.

INCERTIDUMBRE
Catástrofes
Cómo considerar eventos poco probables pero muy perniciosos, como la rápida fusión de los casquetes polares o una gran liberación de gases de efecto invernadero por el deshielo del permafrost.

Modelo de evaluación integrada

MODELO
Ciclo de carbono

SALIDA/ENTRADA
Cambio climático

MODELO
Daños a los ecosistemas

INCERTIDUMBRE
Daños
Cómo medir los daños a la salud, la agricultura, etc.
Lo primero es calcular la sensibilidad climática de equilibrio: cuánto subirán las temperaturas ante un aumento de las emisiones contaminantes.

SALIDA/ENTRADA
Emisiones de carbono

SALIDA/ENTRADA
Reducción de emisiones

MODELO
La economía

INCERTIDUMBRE
Tasa de descuento
Cómo comparar los ingresos actuales con los futuros.
Una tasa baja concede más importancia al bienestar de las generaciones futuras; si se espera que estas sean más ricas, la tasa será alta.

RESPUESTA POLÍTICA
Fijar un impuesto sobre el carbono

JEN CHRISTIANSEN

por la actividad económica, y el impacto del aumento de la temperatura en la atmósfera y en la capa superior del océano. Los MEI son tan importantes que el economista de la Universidad Yale William D. Nordhaus recibió el premio Nobel de economía en 2018 por su trabajo pionero sobre ellos.

Los MEI, como el modelo dinámico integrado de clima y economía (DICE) de Nordhaus, ejercen una gran influencia en la evaluación de políticas. Por ejemplo, la administración Obama utilizó tres MEI, incluido el DICE, para determinar el valor monetario que debía aplicar en los análisis de costes y beneficios de las nuevas regulaciones propuestas, entre ellas el endurecimiento en 2011 de las normas sobre el consumo de combustibles de automoción.

Los modelos parecen responder la pregunta de cómo elegir un tipo adecuado para el impuesto sobre el carbono. Pero las estimaciones de los daños dependen de varios supuestos que presentan una gran incertidumbre. Hay que destacar tres retos fundamentales. El primero es comparar los ingresos actuales frente a los de las generaciones futuras; para ello necesitamos una tasa de descuento, una cifra que también es relevante en muchas decisiones políticas, como fijar las cotizaciones sociales o financiar proyectos de grandes infraestructuras. El segundo reto es cuantificar los daños que producen nuestras emisiones de CO_2. Y el tercero es cómo incluir la posibilidad de que ocurran sucesos poco probables y muy perniciosos: lo que se conoce como catástrofes.

Los cálculos del tipo impositivo óptimo pueden variar mucho dependiendo de cómo se traten esos factores. A la postre, los MEI ofrecen un buen punto de partida para fijar un impuesto sobre el carbono en Estados Unidos, pero los modelos no coinciden en la

cifra «correcta». Además, hay que tener en cuenta las presiones sociales y políticas, que pueden tener una gran influencia: 15 países europeos ya han establecido impuestos sobre el carbono, que van de 2 a 96 dólares por tonelada de CO_2, con un par de valores extremos de menos de 1 dólar y otro de 121 dólares.

EL COSTE SOCIAL DEL CARBONO

La idea de emplear un tributo para sufragar los daños sociales data de hace más de 100 años. El influyente economista de la Universidad de Cambridge Arthur C. Pigou sostenía que, si la polución le genera un coste (un daño) a alguien y el responsable no lo paga, entonces el Gobierno debería gravar la actividad contaminante con un impuesto equivalente a ese perjuicio. En la práctica, Pigou le puso un pulgar verde a la llamada mano invisible de Adam Smith.

Por ejemplo, la combustión de una tonelada de carbón produce unas dos toneladas de dióxido de carbono, al combinarse los átomos de carbono con el oxígeno del aire. Si cifráramos en 50 dólares los daños causados por cada tonelada de CO_2, la receta de Pigou sería imponer una tasa de 100 dólares por tonelada de carbón. De este modo, el precio del carbón incluiría el coste que tiene su quema para la sociedad: el coste social del carbono (CSC). Pero para calcularlo hace falta un MEI.

Es esencial poner precio ya a nuestras emisiones. He aquí una sencilla razón: 2019 fue el segundo año más caluroso desde que existen registros, y los últimos cinco años han sido los más calurosos de los últimos 140

Y aquí es donde entra en escena Nordhaus, que publicó su primer artículo sobre el modelo DICE en 1992. En él estimaba que el CSC en 2015 sería de 4,54 dólares por tonelada de dióxido de carbono. Cuando llegó el año 2015, y tras actualizar el modelo, elevó esa cifra a 31 dólares. Suponiendo que se siguen políticas óptimas, el CSC llegaría a un poco más de 100 dólares por tonelada en el año 2050 y a 265 dólares en 2100. (Todos los valores están expresados en dólares de 2010.)

Estas cifras se sitúan en la zona media de las obtenidas con los principales MEI. Por ejemplo, cuando la administración Obama calculó el CSC para evaluar nuevas regulaciones, empleó el DICE y otros dos modelos muy conocidos: FUND y PAGE. Los valores que arrojaron estos últimos para 2050 fueron aproximadamente la mitad y el doble, respectivamente, que el del modelo DICE.

Los resultados parecen sólidos, pero Robert Pindyck, economista del Instituto de Tecnología de Massachusetts, sostiene que los MEI resultan inútiles porque presentan demasiada incertidumbre. Aunque este punto de vista es muy radical, debemos considerar seriamente los problemas que Pindyck y otros han planteado. Examinemos las tres suposiciones clave de los MEI que pueden tener un gran efecto sobre el CSC: la tasa de descuento, la función de daño y las posibles catástrofes.

DESCUENTOS DE FUTURO

Para tomar cualquier decisión que conlleve costes y beneficios separados en el tiempo, necesitamos una tasa de descuento. Consideremos un activo que me reportará 1000 dólares dentro de 10 años. ¿Cuál es su valor actual? Supongamos que puedo ingresar dinero en una cuenta con un interés compuesto anual del 3 por ciento. Si invierto 744 dólares hoy, dentro de 10 años tendré 1000 dólares. En otras palabras, 1000 dólares dentro de 10 años corresponden a 744 dólares ahora. O, siendo más precisos: el valor actual descontado de un bien que valdrá 1000 dólares dentro de 10 años es de 744 dólares, cuando el descuento es del 3 por ciento.

A la hora de elegir una tasa de descuento, los Gobiernos a veces se basan en el retorno que uno esperaría obtener al invertir en el mercado. En Estados Unidos, por ejemplo, la Oficina de Gestión y Presupuesto suele recomendar un tasa del 7 por ciento para evaluar las regulaciones gubernamentales, ya que ese es el retorno aproximado de las inversiones realizadas en el sector privado en los últimos años.

Para proyectos de larga duración, la diferencia entre descontar al 7 o al 3 por ciento es abismal: el valor actual descontado de un bien que valga un millón de dólares dentro de 250 años es de 4,5 centavos al 7 por ciento, y de 618 dólares al 3 por ciento. Cuanto mayor sea la tasa de descuento, menos deberíamos gastar hoy para reducir las emisiones futuras.

Una tasa de descuento del 7 por ciento parece razonable para proyectos del Gobierno que duren de 5 a 15 años, pero no para acciones relacionadas con el clima, donde los beneficios de la inversión actual podrían persistir 200 años o más. Pero la gente no suele invertir a dos siglos vista, así que en los mercados no hay tipos de interés relevantes por los que regirse. Lo mismo ocurre con las inversiones gubernamentales en infraestructuras: la mayoría de esos proyectos, como el canal de Erie, en Nueva York, tienen una vida útil de 50 a 100 años antes de que haya que reconstruirlos o las innovaciones (las vías del tren y más tarde las carreteras, en el caso del canal) nos hagan abandonarlos.

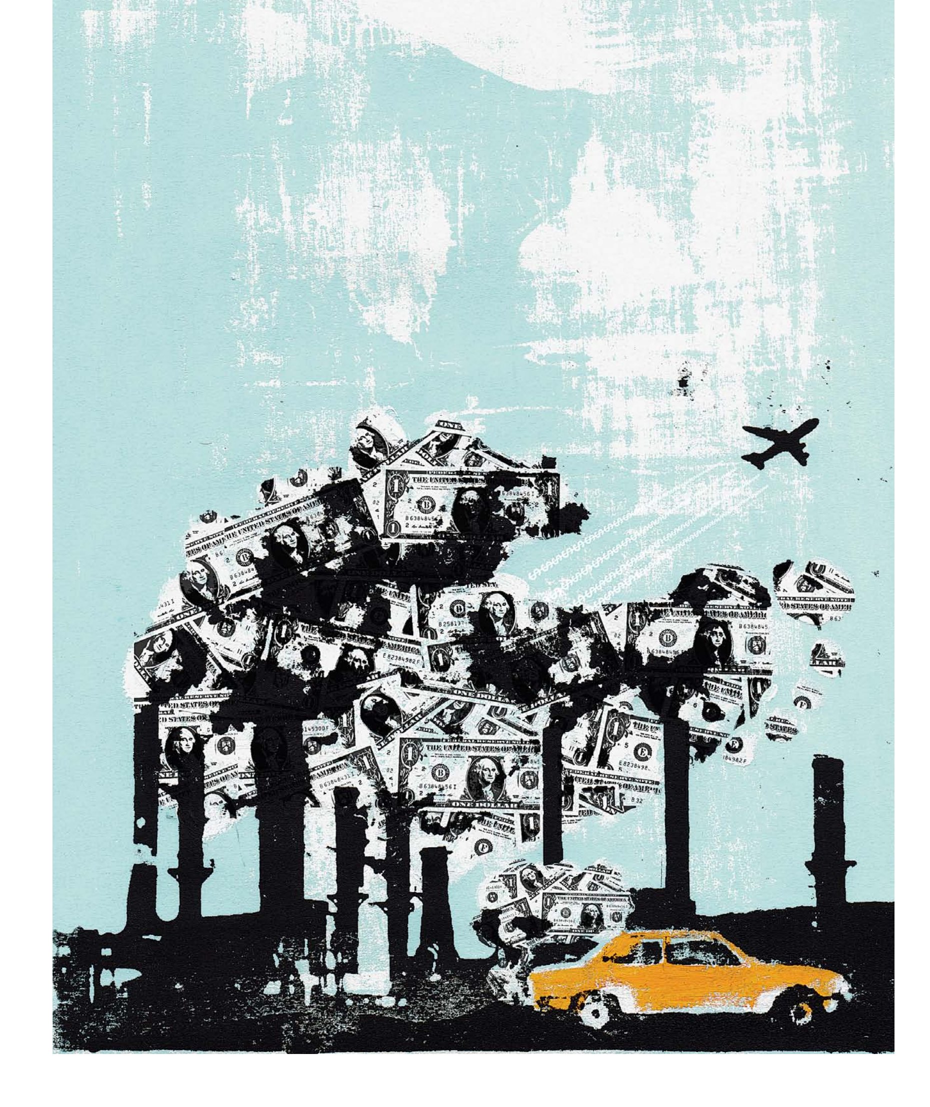
Si no podemos guiarnos por los intereses del mercado, tal vez sea posible aplicar la teoría económica. El economista Frank Ramsey, coetáneo de Pigou, sostenía que la tasa de descuento a largo plazo debía contemplar dos cuestiones. La primera es una decisión ética sobre cómo tratar a distintas generaciones, que nos haría decantarnos por una tasa de descuento baja, sobre la base de que las generaciones futuras merecen la misma consideración que la nuestra. En segundo lugar, hay que tener en cuenta la variación de los ingresos con el paso del tiempo; si las generaciones futuras son más ricas que la nuestra, nos sentiremos menos obligados a incurrir en gastos para mejorar sus condiciones y nos inclinaremos por una tasa de descuento alta.

En 2006, el economista británico Nicholas Stern escribió para el Gobierno del Reino Unido un informe sobre el cambio climático que tenía en cuenta los dos factores mencionados. El denominado *Informe Stern* concluía que la tasa de descuento adecuada para las políticas climáticas era del 1,4 por ciento. Con esa tasa, el valor actual de un millón de dólares a percibir dentro de 250 años es de casi 31.000 dólares, muy superior a los 618 dólares que resultaban de aplicar un descuento del 3 por ciento. A partir de sus resultados, Stern afirmó que el coste del cambio climático era cinco veces mayor que el de recortar las emisiones. El influyente *Informe Stern* contribuyó a conformar el discurso internacional sobre la necesidad de reducir rápida y drásticamente las emisiones.

En la práctica, hay que conciliar los puntos de vista que conducen a tasas de descuento altas y bajas. Una posible solución es

imponer que la tasa disminuya a lo largo del tiempo, en vez de permanecer constante. Por ejemplo, si la incertidumbre sobre los ingresos futuros crece a medida que pasa el tiempo, necesitaremos un factor preventivo. Martin Weitzman, difunto economista de la Universidad Harvard, propugnaba aplicar una tasa de descuento del 4 por ciento a corto plazo y del 1 por ciento para el futuro lejano (dentro de entre 76 y 300 años), con un descenso gradual en los períodos intermedios.

Al final, los economistas no disponen de una referencia clara para determinar la «mejor» tasa de descuento, en parte debido a las decisiones éticas relacionadas con las futuras generaciones. Sin embargo, pequeñas variaciones en dicha tasa pueden traducirse en grandes cambios en el CSC, lo que constituye un factor importante a la hora de fijar un impuesto sobre el carbono.



DAÑOS INCIERTOS

La segunda incertidumbre que afecta al precio del carbono tiene que ver con los estragos que causarán las emisiones de CO_2 en la economía. En el modelo DICE, los daños son, a grandes rasgos, una función del cuadrado del incremento de temperatura. Esta es una manera aproximada de incluir los complejos efectos del calentamiento, como una menor productividad agrícola, una mayor mortalidad a causa del calor y las enfermedades, la pérdida de especies o riesgos geopolíticos como las migraciones humanas motivadas por la sequía.

Nordhaus, al igual que otros expertos en modelos MEI, basó su función de daño en una revisión bibliográfica. Esa es una buena noticia, puesto que la comunidad científica ha hecho grandes progresos en la medición de los efectos del cambio climático. Pero es imposible prever todas las posibles consecuencias adversas, así que Nordhaus aumentó sus estimaciones en un 25 por ciento para compensar. Su función predice unos daños a nivel global equivalentes al 8,5 por ciento de los ingresos mundiales para un aumento de la temperatura del planeta de seis grados Celsius. A modo de comparación, el producto interior bruto de Estados Unidos sufrió una caída de más del 25 por ciento durante la Gran Depresión, de 1929 a 1933.

Los científicos tienen una manera de cuantificar la probabilidad de que se produzca un gran aumento de temperatura. En 1896, el químico sueco Svante Arrhenius determinó, a partir de una serie de mediciones detalladas, que la Tierra se calentaría 4 grados Celsius si se duplicara la concentración de CO_2 en la atmósfera. Esta relación, conocida como sensibilidad climática de equilibrio, ha resultado notablemente duradera. Por desgracia, no hemos hecho grandes avances en lo referente a reducir la incertidumbre que la rodea. El quinto informe de evaluación (el más reciente) del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático afirma que «es probable que la sensibilidad climática de equilibrio esté entre 1,5 y 4,5 grados Celsius, sumamente improbable que sea de menos de 1 grado y muy improbable que sea de más de 6 grados». Pero los daños que causarían un aumento de 1,5 grados y uno de 4,5 grados no tienen nada que ver. Los expertos en MEI lidian con este tipo de incertidumbres ejecutando el modelo miles de veces, con distintos parámetros clave. Luego anuncian los valores centrales y los límites superior e inferior, para dar a los responsables políticos una idea de la incertidumbre en torno al CSC.

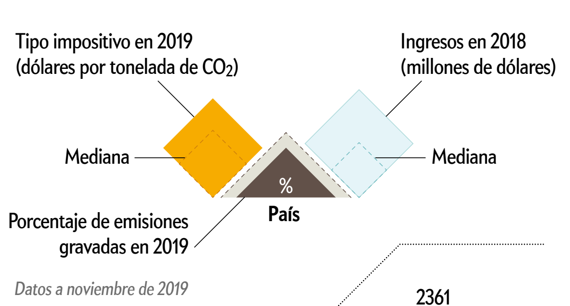
Esta situación no es del todo satisfactoria. Weitzman afirmaba que existía una «probabilidad preocupante» de que la sensibilidad climática de equilibrio estuviera por encima de los 4,5 grados Celsius. Y eso nos lleva al terreno de las consecuencias extremas.

EL PRECIO DE LAS CATÁSTROFES

Las catástrofes son sucesos poco probables y muy perniciosos. Weitzman recitaba una larga letanía de «incógnitas conocidas» que podrían desencadenar una catástrofe, como una rápida subida del nivel del mar causada por la fusión de los casquetes glaciares de Groenlandia y la Antártida Occidental o por cambios significativos en los patrones de circulación oceánica. También contemplaba «incógnitas desconocidas», como retroalimentaciones climáticas descontroladas que aún no hayamos identificado. Por ejemplo, el calentamiento podría derretir todo el permafrost de la Tierra, lo que liberaría enormes cantidades de CO_2 y metano y produciría un aumento desbocado de las temperaturas. Y no son solo disquisiciones teóricas: a principios de año, un informe de la entidad financiera JPMorgan Chase advertía a sus clientes de que «no podemos descartar desenlaces catastróficos que amenacen la vida humana tal y como la conocemos».

¿Cuánto debería costar el carbono?

Más de una veintena de países han establecido impuestos sobre el carbono, con tipos que van desde los 0,08 dólares por tonelada de CO_2 de Polonia hasta los 121 de Suecia. Todos los países gravan solo un porcentaje de las emisiones totales y algunos se limitan a las de ciertas clases de combustibles fósiles. Las presiones políticas podrían explicar estas disparidades. En Estados Unidos, los modelos sugieren una tasa de entre 40 y 47 dólares por tonelada, pero aún no se ha implantado ningún plan.



Datos a noviembre de 2019

País	Tipo impositivo en 2019 (dólares por tonelada de CO_2)	Porcentaje de emisiones gravadas en 2019	Ingresos en 2018 (millones de dólares)
Polonia	0,08	4 %	1
Ucrania	0,38	71 %	4
Estonia	2,21	3 %	3
Japón	2,65	68 %	2361
México	3,00	46 %	306
Letonia	4,97	15 %	9
Colombia	4,99	24 %	93
Chile	5,00	39 %	166
Argentina	6,24	20 %	200
Portugal	14,06	29 %	155
España	16,56	3 %	124
Eslovenia	19,09	24 %	83
Reino Unido (precio mínimo)	21,79	23 %	1091
Irlanda	22,07	49 %	489
Dinamarca	25,91	40 %	543
Canadá (Columbia Británica)	30,26	70 %	1056
Islandia	31,30	29 %	44
Francia	49,23	35 %	9263
Noruega	57,14	62 %	1660
Finlandia	68,43	36 %	1459
Liechtenstein	96,57	26 %	4
Suiza	96,57	33 %	1178
Suecia	121,29	40 %	2572

Mediana de los ingresos
Mediana del tipo impositivo

FUENTE: GRUPO DEL BANCO MUNDIAL; SONIA KUIJPERS, STUDIO TERP (*gráfico*)

Gráficamente, una distribución normal de probabilidad para el posible aumento de temperatura se parece a una joroba, con una zona central abultada (valores más probables) y sendas colas a izquierda y derecha (improbables). A medida que entendemos mejor cómo responde el clima a nuestras emisiones, podemos refinar la forma de esta curva. Todo apunta a que la distribución será «de cola pesada», lo que significa que la probabilidad de que se produzcan grandes incrementos de temperatura (la cola de la derecha) tiende a cero más despacio que en una distribución normal. Eso crea un serio problema para los MEI, que Weitzman bautizó como «teorema desalentador»: la sociedad debería estar dispuesta a pagar una cantidad infinita para evitar los sucesos poco probables y muy perniciosos, pues los daños esperados son infinitos. Es evidente que la sociedad no puede hacer eso.

Weitzman no estaba muy seguro de cómo interpretar su teorema. Señaló que los investigadores debían esforzarse más por entender los sucesos catastróficos, a fin de reducir la incertidumbre sobre su probabilidad y consecuencias. Eso podría ayudar a tomar las decisiones políticas necesarias para responder de manera adecuada a posibles desastres.

CÓMO PROCEDER

Entretanto, debemos determinar el CSC y el tipo impositivo con que gravar el carbono. Las incertidumbres respecto a la tasa de descuento, los daños, la sensibilidad climática y las posibles catástrofes afectan a cualquier cálculo del CSC. Lo único que podemos afirmar con seguridad es que debe ser mayor que cero: cualquier sustancia contaminante conlleva un coste. Resulta alentador apreciar una mayor colaboración entre economistas y científicos —como demuestra el hecho de que la revista *Nature* haya nombrado un editor de economía—, pues eso ayudará a mitigar las incertidumbres.

Los MEI pueden proporcionar a los responsables políticos un punto de partida para establecer un calendario fiscal para el carbono de cara a las próximas décadas. Por ejemplo, los tres modelos que empleó el Gobierno estadounidense en 2016 para analizar posibles regulaciones produjeron un intervalo de valores para el CSC en el año 2020: suponiendo una tasa de descuento del 3 por ciento, el modelo DICE de Nordhaus sugirió un precio medio de 47 dólares por tonelada de dióxido de carbono, mientras que los otros dos modelos arrojaron valores medios de 23 y 84 dólares.

El precio de Nordhaus es muy similar a los 40 dólares por tonelada que propuso el Consejo de Liderazgo Climático. También se acerca al tipo inicial medio de los siete proyectos de ley sobre el impuesto al carbono presentados en el Congreso de EE.UU. En su escenario de base, el tipo del consejo se incrementaría un 5 por ciento cada año, lo que llevaría a un impuesto de 65 dólares en 2030 y de 173 dólares en 2050. Un modelo económico de la Universidad Stanford y de la organización sin ánimo de lucro Resources for the Future (Recursos para el Futuro) apunta a que la propuesta del Consejo de Liderazgo Climático crearía una reducción inmediata del 18 por ciento en las emisiones respecto a una economía estadounidense sin un precio para el carbono; la disminución llegaría al 50 por ciento para el año 2035. Eso pondría a Estados Unidos en disposición de convertirse en un país libre de carbono hacia mediados de siglo.

El impuesto también reportaría cuantiosos ingresos al Gobierno. Un estudio del Departamento del Tesoro de EE.UU. calculó que un impuesto al carbono de esa magnitud recaudaría más de 1,5 billones de dólares en la próxima década, tras considerar las pérdidas empresariales e ingresos fiscales relacionados con el impuesto. Este es un argumento fiscal que quizás encuentren atractivo los legisladores del Congreso, que en algún momento necesitarán fondos para acabar con el vertiginoso déficit presupuestario. Los ingresos también podrían destinarse a sufragar parte de las infraestructuras de cero emisiones que exigiría el Green New Deal (Nuevo Pacto Verde), una propuesta política de los demócratas. Desde esta perspectiva, estaríamos viendo el impuesto al carbono más como un instrumento fiscal que como uno ambiental. Otra posibilidad sería que el Gobierno devolviese lo recaudado a la gente mediante «dividendos del carbono», como ha propuesto el Consejo de Liderazgo Climático.

Un punto de vista distinto se centraría en recortar las emisiones, más que en los posibles ingresos. Al fin y al cabo, gravar el dióxido de carbono no garantiza una determinada reducción de las emisiones, aunque aumentar el coste de estas sin duda hará que disminuyan. Algunos modelos económicos señalan que un impuesto de 43 dólares por tonelada a partir de 2019 habría bastado para que Estados Unidos redujese las emisiones en un 28 por ciento (respecto a los niveles de 2005) antes de 2025, uno de los objetivos a los que se comprometió en el marco del Acuerdo de París.

De manera alternativa, un impuesto sobre el carbono podría verse estrictamente como una póliza de seguros contra catástrofes. El impuesto no eliminaría el peligro, pero ayudaría a atenuarlo. Podríamos denominarlo «efecto Gran Cañón»: si me pongo a admirar el paisaje al borde de un acantilado, corro el riesgo de que una repentina ráfaga de viento me haga perder el equilibrio y caiga al precipicio. Si doy un paso atrás, el riesgo disminuye. Del mismo modo, al reducir las emisiones, mitigamos el riesgo de que ocurra un suceso climático catastrófico.

Un enfoque híbrido consistiría en fijar un impuesto sobre el CO_2 e ir actualizando el tipo impositivo en función de los progresos del país en la reducción de emisiones. Sin embargo, tal actualización resulta problemática. Establecer un gravamen sobre el carbono derivará en una guerra política y, una vez aprobado, no parece probable que el Congreso esté por la labor de reabrir periódicamente el debate para revisarlo y ajustarlo. Una solución sería incluir en la ley inicial un «termostato político»: por ejemplo, se podrían definir objetivos explícitos para la reducción de emisiones en un plazo de 10 y 20 años, y un proceso de ajuste automático del tipo impositivo si el país no avanza hacia la consecución de esas metas. Varias de las propuestas para un impuesto al carbono en Estados Unidos siguen este planteamiento.

Si se decide implantar un impuesto sobre el carbono, habrá que considerar varias cuestiones importantes: qué hacer con los ingresos fiscales; qué hacer por los trabajadores de los sectores económicos con altas emisiones de carbono; cómo incentivar la captura y almacenamiento de carbono; si se debe gravar el dióxido de carbono asociado a los bienes importados; y si habría que relajar algunas regulaciones ambientales como contrapartida política.

También se necesitarán políticas adicionales. Con ciertas fuentes de gases de efecto invernadero, podría ser más rentable aplicar regulaciones que impuestos. Un ejemplo son las emisiones de metano de los yacimientos petrolíferos y de gas. Intentar medirlas y gravarlas no es demasiado realista, y sería más eficaz exigir sistemas que las reduzcan. A un nivel más fundamental, hará falta una mayor financiación de la investigación y el desarrollo con el objetivo de diseñar y comercializar tecnologías energéticas asequibles que no produzcan emisiones, y quizá métodos de captura y almacenamiento de carbono más eficientes [*véase* «El último recurso», por Richard Conniff; Investigación y Ciencia, marzo de 2019].

Es esencial poner precio ya a nuestras emisiones. He aquí una sencilla razón: 2019 fue el segundo año más caluroso desde que existen registros, y los últimos cinco años han sido los más calurosos de los últimos 140.

PARA SABER MÁS

Revisiting the social cost of carbon. William D. Nordhaus en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 114, n.º 7, págs. 1518-1523, febrero de 2017.

On the economics of a carbon tax for the United States. Gilbert E. Metcalf en *Brookings papers on economic activity: Spring 2019*, editado por Janice Eberly y James H. Stock. Brookings Institution Press, 2019.

EN NUESTRO ARCHIVO

Los mercados del carbono. David G. Victor y Danny Cullenward en *IyC*, febrero de 2008.

Ética del cambio climático. John Broome en *IyC*, agosto de 2008.

Cómo descarbonizar la economía. Óscar Arnedillo Blanco y Jorge Sanz Oliva en *IyC*, junio de 2020.



CONSCIENCIA

EXPERIENCIAS DE LA MUERTE INMINENTE

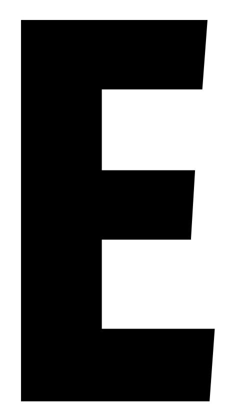
Sobrevivir a un roce con la muerte puede dejar un legado duradero en la psique humana, y quizá nos ayude a entender cómo funciona el cerebro en situaciones límite

Christof Koch

ILUSTRACIONES DE BRIAN STAUFFER

Christof Koch es director científico del programa MindScope del Instituto Allen de Neurociencia. Es autor de *The feeling of life itself: Why consciousness is widespread but can't be computed*. Forma parte del consejo de asesores de *Scientific American*.





ERNEST HEMINGWAY, MALHERIDO DE JOVEN EN UN CAMPO DE BATALLA DE LA Primera Guerra Mundial por la explosión de un proyectil, escribió en una carta a su familia: «Morir es algo muy sencillo. He visto la muerte y por eso lo sé. Si me hubiese muerto, me habría resultado muy fácil, lo más fácil que hubiese hecho jamás».

Años después, Hemingway adaptó esa experiencia (la del alma que abandona el cuerpo, huye y luego vuelve) para su famosa novela *Las nieves del Kilimanjaro,* sobre un safari africano que termina en desastre. El protagonista, con una pierna roída por la gangrena, sabe que va a morir. De repente, el dolor remite y aparece Compie, el aviador que ha de rescatarlo. Juntos despegan y atraviesan una tormenta torrencial en la que les parece «estar volando a través de una cascada», hasta que el aeroplano emerge de nuevo a la luz y ante ellos se yergue «la cima cuadrada del Kilimanjaro, ancha como el mundo entero; gigantesca, alta e increíblemente blanca bajo el sol. Entonces supo que era allí a donde iba». La descripción contiene elementos de una típica experiencia cercana a la muerte: la oscuridad, el fin del dolor, la salida a la luz y la sensación de paz.

PAZ MÁS ALLÁ DE LA RAZÓN

Las experiencias cercanas a la muerte (ECM) se producen a raíz de un episodio que entraña un riesgo inminente de morir, como una fuerte contusión, un infarto de miocardio, la asfixia, el shock, etcétera. De cada diez pacientes en parada cardíaca en los hospitales, uno tiene una experiencia de este tipo. Miles de personas aseguran haber vivido algo estremecedor: abandonar el cuerpo maltrecho y encontrarse en un lugar más allá de la existencia terrenal, un reino liberado de los límites del espacio y el tiempo. En muchos casos, la experiencia mística es tan poderosa que induce una transformación permanente en la persona.

Las ECM no son caprichos de la imaginación. Tienen varios rasgos en común: dejar de sufrir dolor, ver una luz brillante al final de un túnel y otros fenómenos visuales, desprenderse del cuerpo y flotar por encima de él, e incluso salir volando hacia el espacio (experiencias extracorpóreas). Puede haber encuentros con seres queridos (vivos o muertos) o con espíritus celestiales como ángeles, un recuerdo proustiano o una revisión autobiográfica de lo bueno y lo malo («me pasó toda la vida por delante de los ojos») y una distorsión de la noción del tiempo y el espacio. Algunas de estas percepciones tienen una explicación fisiológica: por ejemplo, la visión en forma de túnel se estrecha progresivamente porque el flujo sanguíneo decae antes en la periferia de la retina, de modo que allí es donde primero se pierde la vista.

Las ECM pueden ser vivencias positivas o negativas. Se habla sobre todo de las primeras, caracterizadas por la sensación de una presencia arrebatadora, algo empíreo o divino. Una desconexión radical entre el deterioro físico y la sensación de paz y comunión con el universo. Pero no todas las ECM son agradables: algunas son aterradoras, marcadas por el miedo intenso, la angustia, la soledad y la desesperación.

Es posible que la publicidad en torno a las ECM haya condicionado las expectativas de lo que se siente después. De hecho,

EN SÍNTESIS

Las experiencias cercanas a la muerte se producen cuando el organismo sufre una conmoción repentina, como un infarto de miocardio, un shock o un traumatismo a causa de una explosión o una caída.

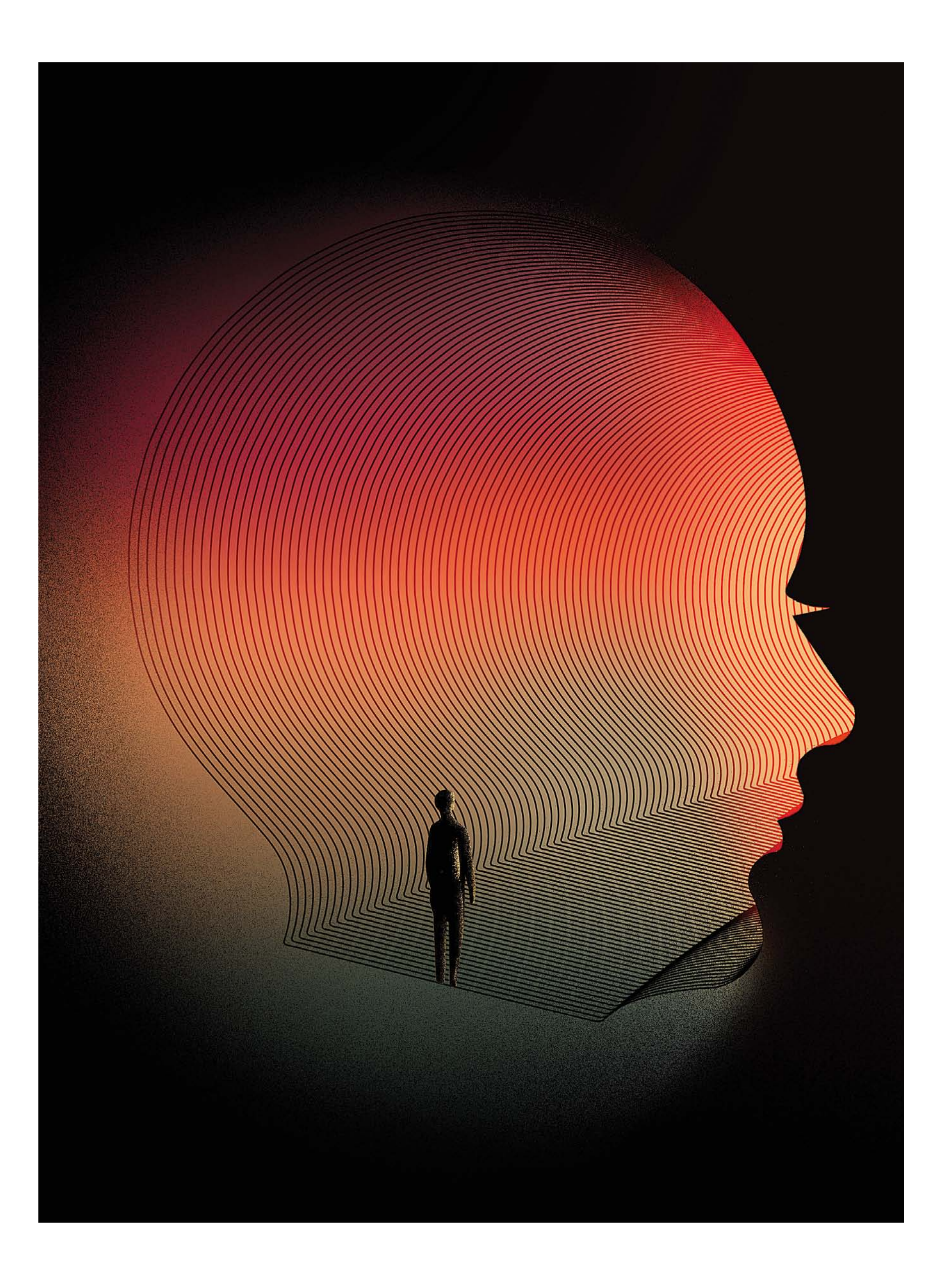
Estas vivencias tienen varios rasgos en común: la ausencia de dolor, la visión de una luz brillante al final de un túnel o el abandono del cuerpo físico para flotar e incluso salir volando hacia el espacio exterior.

Sigue siendo un misterio por qué la mente, que lucha por continuar funcionando ante la privación de sangre y oxígeno, compone un cuadro de felicidad y bienestar en vez de infundirle pánico al individuo.

puede que muchos pacientes se abstengan de explicar las experiencias negativas por vergüenza, estigma social o presión para amoldarse al paradigma de las experiencias «positivas».

Cualquier tipo de roce con la muerte nos recuerda lo precaria y frágil que es la vida. Nos despoja de golpe de todas las capas de represión psicológica, aquella que normalmente nos protege de la idea pavorosa de que, tarde o temprano, dejaremos de existir. En la mayoría de los casos, con el tiempo el trance queda atrás y la normalidad se instala de nuevo (si bien los hay que llegan a provocar trastornos de estrés postraumático). En cambio, las ECM se recuerdan con especial intensidad y lucidez a lo largo de décadas.

Un estudio de 2017, dirigido por dos investigadores de la Universidad de Virginia, se planteó si la paradoja de la potenciación cognitiva asociada a las ECM, que se produce al mismo tiempo que la disfunción cerebral, podía considerarse un capricho de la imaginación. Administraron un cuestionario a 122 personas que habían referido una ECM y les pidieron que compararan los recuerdos de su experiencia con los de hechos reales e imaginados de la misma época. Los resultados indican que las ECM se recuerdan con mayor nitidez y detalle que las situaciones verídicas o imaginadas. En resumen, las ECM se recuerdan como si fuesen «más reales que la realidad».



Las ECM se hicieron conocidas en el último cuarto del siglo xx por el trabajo de diversos médicos y psicólogos, sobre todo Raymond Moody, quien acuñó el término «experiencia cercana a la muerte» en su superventas de 1975, *La vida después de la vida,* y Bruce M. Greyson, uno de los dos investigadores del estudio mencionado, que también publicó *The handbook of near-death experiences* en 2009. Advirtiendo las semejanzas en el relato de dichas experiencias, estos investigadores han convertido lo que antes se tildaba burlonamente de fabulaciones o alucinaciones febriles (visiones del pasado en el lecho de muerte) en un campo de estudio empírico.

Yo acepto la realidad de estas experiencias tan vívidas. Son igual de auténticas que cualquier otra sensación o percepción subjetiva. Como científico, no obstante, trabajo con la premisa de que todos nuestros pensamientos, recuerdos, preceptos y experiencias son consecuencia ineluctable de las facultades fisiológicas de nuestro cerebro, y no de fenómenos sobrenaturales. A la ciencia y a su doncella —la tecnología—, esta premisa les ha reportado un enorme provecho en los últimos siglos, así que, a menos que aparezcan pruebas objetivas, extraordinarias e irrefutables, no veo motivo para abandonarla.

La dificultad radica, pues, en explicar las ECM en un marco natural. Estudio el problema cuerpo-mente desde hace mucho tiempo y me interesan las ECM porque constituyen una rara variante de la consciencia humana. Además, es muy destacable que un suceso que dura menos de una hora deje una huella tan permanente en la persona, una conversión de San Pablo en el camino de Damasco: no más miedo a la muerte, desapego de los bienes materiales y una orientación hacia el bien común. Aunque también, como en el caso de Hemingway, una obsesión con el riesgo y la muerte.

Se han descrito experiencias místicas parecidas con el consumo de sustancias psicodélicas que actúan sobre la serotonina, como la psilocibina (el principio activo de las setas alucinógenas), el LSD, la DMT (la «molécula del espíritu») y la 5-MeO-DMT (la «molécula de Dios»), con fines religiosos, espirituales o recreativos.

UN PAÍS POR DESCUBRIR

Hay que recordar que las ECM han estado con nosotros en todas las épocas, culturas y personas, jóvenes y viejas, devotas y escépticas (pensemos, por ejemplo, en el llamado *Libro tibetano de los muertos,* que describe la mente antes y después de

la muerte). Para quienes han sido educados en la fe religiosa, ya sea la cristiana o cualquier otra, la explicación más obvia es que se les ha concedido una visión del cielo o el infierno, de lo que les depara el más allá. Sin embargo, las ECM no son más frecuentes entre los creyentes que entre los no religiosos o no practicantes.

El registro histórico guarda descripciones personales muy ricas de las ECM, igual de ilustrativas que un frío informe clínico, si no más. En 1791, por ejemplo, el almirante británico Francis Beaufort (que da nombre a la escala anemométrica de Beaufort) estuvo a punto de ahogarse, un incidente que luego recordaría con estas palabras:

> *La más perfecta tranquilidad sucedió a una turbación máxima* [...]. *No sentía dolor físico alguno. Al contrario, mis sensaciones cobraron un molde placentero* [...]. *Mis sentidos se amortiguaron, mas no así la mente, cuya actividad pareció vigorizarse en tal magnitud que desafía toda descripción, sucediéndose pensamiento tras pensamiento a una velocidad no solo indescriptible, sino probablemente inconcebible para quienquiera que no haya estado en la misma situación. Aún hoy soy capaz de recorrer de nuevo, en gran medida, aquellos pensamientos. Partiendo de lo que acababa de acontecerme* [...] *y viajando hacia atrás, se representaron ante mí todos y cada uno de los hechos de mi vida, en una procesión ejecutada en retroceso* [...]. *Todo el período de mi existencia se desplegó ante mí en una suerte de visión panorámica.*

En otro caso del año 1900, el cirujano escocés Alexander Ogston (descubridor de los estafilococos), fue presa de la fiebre tifoidea y describió así lo que le sucedió:

> *Yacía en un estupor continuo, en el que no cabían ni esperanzas ni miedos. La mente y el cuerpo se desdoblaron y, hasta cierto punto, estaban separados. Era consciente del cuerpo, como una masa inerte desplomada junto a una puerta; me pertenecía a mí, pero no era yo. También era consciente de que mi ser psíquico abandonaba con frecuencia mi cuerpo físico* [...]. *De pronto me precipité de nuevo hasta mi cuerpo, me reintegré en él con repugnancia, y me convertí otra vez en yo; me alimentaron, me hablaron y me cuidaron* [...]. *Y aunque yo sabía que la muerte me rondaba, no albergaba pensamientos religiosos ni terror ante el final, sino que me elevaba bajo los cielos plomizos, apático y satisfecho, hasta que algo volvía a perturbar el cuerpo físico y yo caía de nuevo hasta él.*

En tiempos más recientes, la escritora inglesa Susan Blackmore recibió una carta de una mujer de Chipre sometida a una gastrectomía de urgencia en 1991:

> *El cuarto día después de la operación, entré en shock y estuve varias horas en coma* [...]. *Aunque el cirujano y el anestesiólogo creían que yo estaba inconsciente, durante años recordé, con todo lujo de detalles, la conversación que tuvieron delante de mí* [...]. *Yo levitaba en posición horizontal, por encima de mi cuerpo, sin ningún dolor, me contemplaba a mí misma desde arriba y sentía compasión por el dolor atroz que se reflejaba en mi rostro; flotaba en paz* [...]. *Me iba a otro lugar, deslizándome hacia una zona parecida a una cortina oscura, pero no me daba miedo* [...]. *En ese momento sentí una paz absoluta. De repente, cambió todo, caí a plomo y entré de nuevo en mi cuerpo, donde volví a sentir con crudeza el dolor que me atormentaba.*

Resulta difícil determinar con precisión la secuencia de fenómenos neurológicos que configuran una ECM, porque las lesiones que puede sufrir el cerebro son innumerables. Además, las ECM no sobrevienen cuando la persona está dentro de un escáner de resonancia magnética ni cuando tiene la cabeza cubierta de electrodos de electroencefalografía.

Con todo, es posible hacerse una idea de lo que ocurre si examinamos una parada cardíaca en el ámbito hospitalario, cuando el corazón deja de latir. El paciente no ha muerto, porque todavía es posible reiniciar el corazón mediante la reanimación cardiopulmonar.

La definición moderna de muerte requiere el cese irreversible de las funciones encefálicas. Cuando el cerebro deja de recibir el riego sanguíneo (isquemia) y el aporte de oxígeno (anoxia), la persona pierde el conocimiento en cuestión de segundos y el electroencefalograma se vuelve isoeléctrico, es decir, plano [*véase* «Qué ocurre en nuestro encéfalo cuando morimos» por Anna Von Hopffgarten; Mente y Cerebro n.º 93, 2018]. Esto significa que se han interrumpido los impulsos eléctricos amplios que barren a intervalos regulares la corteza cerebral, la capa más externa del cerebro. Al igual que el apagón de una ciudad que avanza barrio por barrio, las regiones del cerebro se desconectan una tras otra. La mente, cuyo sustento son las neuronas capaces de seguir generando actividad eléctrica, hace lo que está acostumbrada a hacer: compone una historia con las experiencias, los recuerdos y las expectativas culturales de la persona.

Las regiones del cerebro se apagan una tras otra. La mente, cuyo sustento son las neuronas que se mantienen intactas, hace lo que está acostumbrada a hacer: compone una historia con las experiencias, los recuerdos y las expectativas culturales de la persona

Es posible que estos apagones produzcan las alucinantes historias características de las ECM. Para la persona que la vive, la ECM es tan real como cualquier producto de la mente durante la vigilia normal. Cuando todo el cerebro se apaga por la ausencia total de actividad eléctrica, la mente se extingue junto con la consciencia. Si se restablecen el flujo sanguíneo y el aporte de oxígeno, el cerebro vuelve a encenderse y la narración se reanuda.

Los científicos han grabado, analizado y diseccionado la pérdida y posterior recuperación de la consciencia de personas muy

entrenadas: pilotos de pruebas del Ejército estadounidense y astronautas de la NASA sometidos a centrifugadoras durante la Guerra Fría (recordemos la escena de la película *El primer hombre,* de 2018, en la que un estoico Neil Armstrong, encarnado por Ryan Gosling, da vueltas en una silla multiaxial hasta que se desmaya). Cuando la fuerza de la gravedad se quintuplica, el aparato circulatorio deja de bombear sangre al cerebro y el piloto sufre un síncope. Entre diez y veinte segundos después de remitir estas fuerzas *g*, la consciencia regresa, acompañada de un intervalo equivalente de confusión y desorientación —obviamente, los sujetos de estos experimentos están en muy buena forma física y se enorgullecen de su autocontrol—.

Los fenómenos que describen estos hombres podrían considerarse una «ECM leve»: visión en túnel y luces brillantes; sensación de despertar tras haber dormido, con parálisis parciales o completas; sensación de paz y levedad; experiencias extracorpóreas; placer e incluso euforia; y sueños cortos pero intensos, en los que a menudo hablan con familiares y que después se retienen muy nítidos en la memoria durante años. Estas vivencias intensas, desencadenadas por una agresión física concreta, normalmente están desprovistas de todo carácter religioso —quizá porque los participantes sabían de antemano que el experimento les haría perder la consciencia—.

Por su naturaleza intrínseca, las ECM no pueden someterse a una experimentación controlada, aunque es posible que esto cambie. Por ejemplo, quizá se puedan estudiar algunos de sus aspectos en los humildes ratones de laboratorio; quizás estos animalitos también sean capaces de vivir una revisión autobiográfica de sus recuerdos o de experimentar euforia antes de morir.

LA LUZ QUE SE APAGA

Muchos neurólogos señalan similitudes entre las ECM y un tipo de ataque epiléptico, las crisis parciales complejas. Se trata de crisis convulsivas que alteran parcialmente la consciencia y suelen localizarse en regiones específicas de un hemisferio cerebral. Pueden ir precedidas de un aura, un fenómeno muy variado y particular de cada paciente, que preludia la aparición de una crisis. Las crisis pueden cursar con alteraciones en la percepción de los objetos, así como sabores, olores y sensaciones físicas inusuales, paramnesias de tipo *déjà vu,* despersonalización y sentimientos de éxtasis. En el ámbito clínico, estos episodios también se denominan «crisis de Dostoievski», en honor al escritor ruso del siglo XIX, Fiódor Dostoievski, que padecía una grave epilepsia del lóbulo temporal. El príncipe Myshkin, protagonista de su novela *El idiota,* rememora:

> *Pensó en que en su estado epiléptico había una etapa cabalmente antes de la crisis (si esta ocurría cuando estaba despierto) en la que de improviso, en medio de la tristeza, la oscuridad mental, la depresión, le parecía que su cerebro se encendía por unos instantes, y con un impulso extraordinario todas sus fuerzas vitales alcanzaban de golpe el máximo grado de tensión. La sensación de estar vivo, a la par de la de su propia consciencia, se multiplicaban por diez en esos instantes que duraban lo que un relámpago. Su mente y su corazón se inundaban de insólita luz; toda su agitación, todas sus dudas, todas sus inquietudes, parecían apaciguarse a la vez, se resolvían en una especie de calma superior, rebosante de alegría y esperanza serenas y armoniosas, henchidas a su vez de comprensión y conocimiento de la causa final. Pero tales instantes, tales ráfagas de intuición, eran solo el presentimiento de un último segundo (nunca más de un segundo) en que comenzaba la crisis propiamente dicha. Ese segundo era, por supuesto, insoportable. Reflexionando sobre ese momento cuando volvía a sentirse bien, se decía* [...]: *«¿Qué importa que sea una enfermedad?* [...] *¿Qué importa que esa tensión sea anormal si el resultado —ese instante de sensación tal como es evocado y analizado cuando se vuelve a la normalidad— muestra ser en alto grado armonía y belleza, provoca un sentimiento, inaudito e insospechado hasta entonces, de plenitud, mesura, reconciliación, y una fusión enajenada y reverente de todo ello en una elevada síntesis de la vida?* [...] *¡Sí, por un momento como este se puede dar toda una vida!»*

Más de 150 años después, los neurocirujanos son capaces de inducir raptos de éxtasis semejantes estimulando eléctricamente la región de la corteza denominada «ínsula» en epilépticos que tienen electrodos implantados en el cerebro. La técnica permite localizar el área donde se originan las crisis para valorar su extirpación quirúrgica. Los pacientes refieren felicidad, un incremento del bienestar y una mayor autoconsciencia o percepción del mundo externo. La excitación de la materia gris de otras regiones puede producir experiencias extracorpóreas o alucinaciones visuales. Este vínculo crudo entre los patrones de actividad anómalos —provocados por el proceso patológico o controlados por el electrodo del médico— y la experiencia subjetiva respalda la hipótesis de una base biológica y no espiritual. Lo mismo ocurre seguramente con las ECM.

Lo que sigue siendo un misterio es por qué la mente, en una situación de isquemia y anoxia, en la que tiene que luchar por seguir funcionando, intenta componer un cuadro de gozo y placidez, en vez de infundir pánico al individuo. Es intrigante que, en el límite extremo de las experiencias humanas, haya otras actividades en las que la privación de oxígeno también genera placer, alborozo, desvanecimiento y excitación: el buceo en apnea, la escalada de alta montaña, el vuelo en parapente, el juego de ahogarse o la asfixia sexual.

Quizá, las experiencias de éxtasis sean comunes a muchas formas de morir, siempre que la mente se mantenga lúcida y no esté empañada por los opiáceos u otros analgésicos. La mente, encadenada a un cuerpo moribundo, visitaría su propia versión del cielo o el infierno antes de entrar en lo que Hamlet llamó «ese país por descubrir, de cuyos confines ningún viajero retorna». IyC

PARA SABER MÁS

The handbook of near-death experiences: Thirty years of investigation. Dirigido por Janice Miner Holden, Bruce Greyson y Debbie James. Praeger, 2009.

Leaving body and life behind: Out-of-body and near-death experience. Olaf Blanke, Nathan Faivre y Sebastián Diéguez en *The neurology of consciousness*, 2.ª edición. Dirigido por Steven Laureys, Olivia Gosseries y Giulio Tononi. Academic Press, 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

En el umbral de la muerte. Detlef B. Linke en *MyC*, n.º 7, 2004.

Pérdida y recuperación de la consciencia. Don M. Tucker y Mark D. Holmes en «En busca de la consciencia», colección CUADERNOS, n.º 13, 2016.

¿Es reversible la muerte? Christof Koch en *IyC*, diciembre de 2019.



GWANJENJE, PIGMEA BAYAKA, elige un lugar para montar una nueva choza en el norte del Congo, en 1997. Los cazadores-recolectores se desplazan por la selva al ritmo de las estaciones. Cada mujer carga con todos los enseres y posesiones en una cesta.



SOSTENIBILIDAD

VIVIR CON LA SELVA

Los pigmeos de la cuenca del Congo gozaban de una vida ufana, hasta que el progreso y los conservacionistas llegaron de la mano

Jerome Lewis | *Fotografías de Nico Lewis*



Jerome Lewis es antropólogo, director del Centro de Antropología para la Sostenibilidad y codirector del grupo de Ciencia Ciudadana Extrema del Colegio Universitario de Londres. En 2019 fundó Fortalecimiento de la Diversidad, que pretende concienciar sobre los métodos indígenas de protección de la naturaleza.

Nuestro canto resuena en la negrura cerrada de la selva. Sentados casi a tocar unos de otros, la voz dibuja una melodía yodel que se superpone con las de los demás hasta crear una densa armonía. Al paso de las horas, todas se acaban fundiendo y nos sumergimos en el entramado humano y sonoro que hemos tejido. El cántico gana en intensidad y coordinación hasta que su musicalidad consigue que el yo se desvanezca. Creen los bayaka que tal esplendor atrae a los espíritus de la foresta hacia el campamento y los invita a unirse a nosotros. Flotan en derredor como puntitos de luz; se acercan y se retiran sucesivamente hacia la espesura, mientras sus tenues voces silban dulces tonadas que a veces se deslizan en la polifonía. Abrumados por la belleza que hemos creado, algunos gritan «*¡Njoor!*» (¡Madre mía!), «*Bisengo*» (¡Extraordinario!) o «*¡To bona!*» (¡Así, sin más!)

LOS CLANES DE PIGMEOS que habitan en la cuenca del Congo comparten las mismas estrategias para vivir en la selva, entre ellas sus características «sesiones espirituales» y las chozas confeccionadas con hojas y lianas. En 1997, Ingoyo techa la suya con follaje en el campamento nuevo.

En esos momentos tiene uno la sensación de fundirse con la selva, de que los sentidos se expanden envolviendo a todo árbol, animal o ser humano cercano. Experimentar tal grandeza, como me ocurrió a mí durante mis estudios entre los pigmeos bayaka de la República del Congo, en la década de 1990, resulta profundamente conmovedor y traba un vínculo de amor y gozo con cada objeto y persona del entorno. Durante semejante «sesión espiritual», una forma de representación teatral de gran poder de inmersión, los bayaka se sienten en comunión directa con la selva, le comunican sus cuidados y atenciones y reafirman una profunda relación de apoyo y apego mutuos. Como dice mi amigo Emeka: «Un bayaka ama el bosque tanto como a su cuerpo».

Los bayaka observan unas reglas estrictas de caza y recolección. Recogen los ñames silvestres de tal modo que rebrotan de nuevo, nunca matan a sabiendas una hembra preñada y consumen todo lo que recogen. Durante milenios, su comportamiento y los de otras tribus pigmeas de la cuenca del Congo ha mejorado la productividad de la selva, lo cual no solo ha redundado en beneficio propio, sino en el de todos los demás moradores. Desconocen la palabra *hambruna*. Cuando una noche, reunidos en torno a una fogata, les expliqué que hay lugares donde la gente se muere de hambre, reaccionaron con escepticismo e incredulidad.

Con todo, aquella misma década de 1990, las instituciones internacionales como el Banco Mundial, en colaboración con Gobiernos nacionales y agencias conservacionistas, empezaron a implementar modelos de desarrollo sostenible en la cuenca del Congo. Dividieron la selva en grandes extensiones que destinaron a la explotación comercial y a otras actividades reservando «áreas protegidas» como refugios para la fauna y la flora. Conforme a la creencia de que la naturaleza se abre paso cuando no es perturbada por el ser humano, surgida de la mente de los legisladores estadounidenses del siglo xix, los Gobiernos locales excluyeron a las tribus pigmeas de las reservas naturales.

EN SÍNTESIS

Los pigmeos han poblado las selvas de la cuenca del Congo desde hace más de 55.000 años. Allí han sabido prosperar gracias a estrategias ecológicas y culturales elaboradas.

El desarrollo sostenible, encarnado en la combinación de actividades extractivas y zonas protegidas, ha abierto una red de carreteras y pistas que ha disparado el furtivismo.

Cuando la fauna y la flora comenzaron a sufrir las consecuencias, los conservacionistas contrataron «guardas» para contener a los furtivos, pero en lugar de eso, algunos se han dedicado a perseguir a los pigmeos, sembrando el hambre y la degradación.

EL PROBLEMA SOBRE EL MAPA

El desarrollo en el Congo

Desde la década de 1990, las instituciones internacionales, las agencias de conservación y los Gobiernos locales han dividido la cuenca del Congo en áreas de tala y otras actividades, junto con zonas naturales protegidas. A los pigmeos se les permite la caza de subsistencia en algunas, pero en la práctica, la mayoría teme a los guardas y no osa aventurarse en la selva. Forzados así a abandonar su modo tradicional de vida, muchos merodean por los poblados madereros, como Pokola, con la esperanza de encontrar un trabajo precario.



FUENTES: GLOBAL FOREST WATCH (*áreas protegidas, concesiones madereras, pistas forestales*); SURVIVAL INTERNATIONAL (*reservas de caza deportiva*); WORLD WILDLIFE FUND (*Messok Dja*); MAPPING SPECIALISTS (*mapa*)

Desde entonces observo cómo un ecosistema exuberante, rebosante de elefantes, gorilas, chimpancés, hiloqueros, monos y antílopes se va transformando en una selva depauperada a medida que los mercados nacionales e internacionales explotan los productos forestales. La población de paquidermos de África central disminuyó más del sesenta por ciento entre 2002 y 2011, descenso que no ha cesado. Los otrora activos, joviales y bien alimentados bayaka son ahora trabajadores eventuales, desnutridos y alcohólicos, que residen en los límites de sus antiguos dominios, atemorizados por los guardas y sometidos a la explotación laboral y sexual de extraños. Durante milenios prosperaron en la cuenca del Congo para sucumbir en solo unas décadas ante el ansia de recursos naturales de la civilización industrial y una estrategia colonial que pretende salvaguardarlos mediante la expulsión de los indígenas de sus tierras.

En contraposición con este enfoque conservacionista vertical, que suele ir de la mano de las industrias extractivas y tiende a incumplir las intenciones declaradas, va ganando terreno con rapidez un modelo horizontal de defensa de la naturaleza. La conclusión de un informe de 2019 publicado por la Plataforma Intergubernamental Científico-Normativa sobre Biodiversidad y Servicios de los Ecosistemas de la ONU era que quien mejor preserva la riqueza biológica son los pueblos indígenas. Y el ochenta por ciento de la biodiversidad terrestre del planeta coincide con el sesenta y cinco por ciento de la superficie que de uno u otro modo gestionan. Con el reconocimiento de esta realidad, el nuevo paradigma conservacionista busca empoderar a las poblaciones autóctonas para que resistan la presión de los emporios comerciales que invaden sus tierras.

Los propios bayaka me ayudaron en uno de esos proyectos. El programa Ciencia Ciudadana Extrema (ExCiteS) permite a los pobladores locales cartografiar sus recursos y los peligros que los acechan, además de compartir sus conocimientos ecológicos con terceros. Las herramientas y metodologías que diseñamos en la cuenca del Congo están demostrando su validez en otras partes del mundo. Con la última versión de nuestra herramienta cartográfica, la aplicación Sapelli, la red comunitaria del bosque Prey Lang en Camboya ha tenido tal éxito en la protección de este ecosistema que en 2015 ganó el prestigioso Premio Equator, en 2017 el galardón a la innovación de la Sociedad Internacional de Expertos en Bosques Tropicales de Yale, y en 2019 el premio de Energía Mundial.

UN BAYAKA DE PURA CEPA

Cuando en 1994 mi mujer, Ingrid, nuestro hijo de tres años, Nando, y yo arribamos a la orilla arenosa del río Sangha, en el noroeste del Congo, y con no poca aprensión saltamos de la canoa, fue Emeka quien nos recibió con una cálida sonrisa. Era un hombre carismático, en la treintena, que pertenecía a un grupo de unos cuarenta pigmeos acampados en la zona. Los clanes de estos cazadores-recolectores viven a lo largo de la cuenca del Congo (que se extiende desde Uganda, Ruanda y



LOS NIÑOS BAYAKA disfrutan con un columpio fabricado con lianas en 1997. La selva les dota de los juguetes que necesitan.

Burundi al este, hasta el océano Atlántico al oeste), hablan varias lenguas y se calcula que suman entre 300.000 y un millón de personas. Todos se consideran habitantes originarios del bosque; los estudios de ADN indican que su presencia en la región se remonta a unos 55.000 años.

A pesar de sus diferencias superficiales, estos clanes que todavía viven en bosques vírgenes, comparten estrategias similares para desenvolverse en ellos: chozas de hojas y lianas en forma de iglú, útiles para la caza o la recolección de la miel, y un canto peculiar que permite entrar en comunión con los espíritus de la selva. A lo largo de los tres años siguientes, Ingrid, Nando y yo recorrimos miles de kilómetros de selva con Emeka, su esposa Mambula y otros muchos miembros del extenso clan, durante los cuales compartimos su modo de vida, igualitario y vivaz. Nuestros compañeros de viaje nos enseñaron a manejarnos como cazadores-recolectores: vadear amplias zonas pantanosas, encontrar trochas de elefantes por las que caminar, cazar, recolectar fruta, tubérculos, hojas comestibles o insectos de temporada, represar arroyos para atrapar peces y jugar con los espíritus de la selva eran algunas de las asignaturas.

Emeka fue nuestro guía. Demostró ser un cazador fuerte y valiente; un marido y padre indulgente y solícito; un mediador ecuánime y sabio consejero; un buen orador, cantante, narrador y director de obras de teatro improvisadas en el campamento; y generoso hasta el extremo. La economía bayaka se basa en el principio de que si alguien tiene algo que deseas, basta con pedirlo. Vivir en una economía de «compartir a demanda» (como la denominan los antropólogos) es como vivir en un lugar donde los bienes son gratis. Aunque alguien contribuya poco —debido a su condición de niño, anciano o incapacitado—, nadie discutirá

jamás su derecho a recibir una parte de lo que llega al campamento. Emeka siempre daba todo lo que tenía.

Los bayaka rechazan tajantemente la idea de que el mundo natural se pueda poseer. «Komba [el creador] hizo la selva para que la compartieran todas las criaturas» me dijo Emeka. En cierta ocasión, durante una cacería nocturna, él y yo acampamos cerca de un grupo de gorilas. El macho dominante olió el humo de la fogata y quiso intimidarnos con gruñidos y mostrando sus fauces. Emeka se puso furioso. Con gritos y maldiciones reprendió al simio por actuar como si la selva le perteneciese: existe para satisfacer las necesidades de todos sus moradores. En otra ocasión, mi amigo Tuba me dijo señalando a su hijo pequeño: «Mira, se alimenta de lo que la selva provee y ella hace que crezca fuerte». En efecto, los bayaka se ven a sí mismos como una selva encarnada en hombre; se sienten tan parte de ella que no conciben la venta de una porción, como uno no concibe vender un pulgar o un pie.

Desde esa misma óptica, sostienen que la selva será pródiga mientras todo el mundo respete ciertos principios. La escasez o la necesidad surgen del no compartir de la manera adecuada y de la desarmonía social que ello provoca; no de la incapacidad de la naturaleza para proveer. Un conjunto de normas denominadas *ekila* asegura la plenitud. Si un trozo de bosque deja de ser productivo, los bayaka lo acordonan para que nadie entre a cazar o recolectar; la veda se levanta cuando la zona se recupera. Todos los habitantes del campamento deben recibir una porción de la caza y tratar la presa con respeto. La selva cuida de sus habitantes y desea escuchar sonidos agradables que emanen de ellos; compartir canciones y risas con ella hará que sea dadivosa. Así pues, las principales instituciones sociales de los bayaka no solo aseguran la abundancia, también festejan y promueven la alegría.

El tiempo que pasamos recorriendo la selva en la década de 1990 fue idílico. Nos alimentábamos de lo que encontrábamos y nos movimos con libertad y sin miedo. Bailamos y representamos obras espirituales durante días, incluso semanas. «Este pueblo ha sabido encontrar en la selva una vida plena, que pese a todas las adversidades, problemas y tragedias, resulta maravillosa, dichosa y despreocupada», escribía tres décadas antes el antropólogo Colin Turnbull sobre los pigmeos bambuti del noreste del Congo, a casi 1000 kilómetros de distancia. Yo tuve la misma sensación con los bayaka.

Pero se avecinaban problemas. En 1993, la Sociedad para la Conservación de la Fauna Silvestre (WCS, por sus siglas en inglés), en colaboración con el Banco Mundial, fundó el Parque Nacional Nouabalé-Ndoki en la República del Congo. Abarcaba 4000 kilómetros cuadrados en la frontera con la República Centroafricana con el fin de proteger elefantes, bongos, chimpancés y gorilas. Como los pigmeos apenas dejaban rastro de su presencia, las autoridades y los científicos de la WCS declararon la zona deshabitada. Cuando las patrullas forestales se cruzaban con ellos en la reserva, los desalojaban. Como consecuencia, los clanes bayaka del Congo quedaron separados de sus parientes de la República Centroafricana y perdieron el acceso a extensas zonas, en las que habían vivido en comunión durante generaciones.

Los límites del parque se extienden 150 kilómetros al norte de donde yo campaba con el clan de Eneka, por lo que no notamos directamente su impacto. Pero nos hallábamos en la amplia zona periférica de protección, donde las madereras operan concesiones extensivas. Aquel fue el principio del fin de un espacio fecundo y próspero en el que florecía la diversidad.

EL SAPELI

Recuerdo nuestro primer encuentro con una pista forestal en 1994. Mis compañeros bayaka se quejaron de lo dura que notaban la tierra bajo sus pies, del calor que hacía sin la sombra de los árboles y de la cantidad de molestas moscas. Emeka y yo no pudimos contener la risa cuando las mujeres corrieron a ocultarse en la espesura ante el estruendo del primer camión maderero, como si les persiguiese un búfalo. Con el tiempo, las carreteras acabaron surcando la selva en múltiples direcciones, facilitando la explotación de la carne de caza, las plantas comestibles y otros productos forestales destinados al abasto de los mercados urbanos.

Las empresas madereras mostraron particular interés por el magnífico sapeli (*Entandrophragma cylindricum*). Resistente al agua y a las plagas, esta madera noble de extraordinaria dureza y veta iridiscente, goza de gran demanda en el mercado internacional. Pero el sapeli era imprescindible en la vida de los pigmeos. En una ocasión me quejé de dolor de pies tras una marcha de 60 kilómetros. Emeka arrancó un pedazo de corteza en forma de rombo; la capa interna posee propiedades analgésicas y antibacterianas. Colocó el pedazo bocabajo sobre la fogata para que se calentaran los aceites curativos y después lo dejó en el suelo. Me indicó que pusiera los pies encima: la mejoría fue inmediata y reconfortante. Muchas veces vi que los niños con paludismo inhalaban el vapor de la corteza en cocción como febrífugo.

Aún más importante es que los sapelis más altos emergen por encima del dosel arbóreo y poco antes de la estación lluviosa atraen hordas de mariposas (*Imbrasia oyemensis*), que ponen los huevos en su follaje. Estos se convierten en orugas grandes, deliciosas y nutritivas, tan abundantes que cubren la base del árbol como una alfombra. Los pigmeos no solo las aprecian por su sabor, sino porque llegan justo cuando la lluvia aleja a los animales de los abrevaderos naturales dificultando la caza. «Komba envió a las orugas para alimentar a la gente cuando escasea la caza», me contó Emeka mientras las asábamos ensartadas sobre brasas y degustábamos su sabor a carne.

Aunque los bayaka se alarmaron sobremanera cuando los madereros comenzaron a talar los árboles «de las orugas» que habían explotado durante generaciones, su arraigado *ethos* de compartición les impedía oponerse o mostrar su rechazo. «En la selva hay suficientes árboles para todos; podemos compartir algunos», decían al principio.

Mi familia y yo tuvimos que marchar del Congo en 1997 a raíz del estallido de una guerra civil, pero seguí visitando la región con regularidad para continuar la investigación. Con la paz, en el año 2000, un nuevo Gobierno con problemas de liquidez abrió la selva de par en par a las madereras. Construyeron innumerables carreteras que se adentraban en zonas aún más remotas. En 2003, la producción se había duplicado con creces respecto a la década de 1990: más de 1,3 millones de metros cúbicos de troncos, y seguía aumentando.

Conscientes de esa tendencia, los ecologistas presionaron a las madereras que operaban en la cuenca del Congo para que cumplieran las normas del Consejo de Administración Forestal (FSC, por sus siglas en inglés). Estas obligan a acatar las leyes nacionales de impacto ambiental, a mantenerse lejos de las zonas de alto valor ecológico (como los espacios con una alta densidad de chimpancés) y a respetar los derechos de los trabajadores y los habitantes del bosque. La empresa multinacional Congolaise Industrielle des Bois (CIB), que operaba en 1,3 millones de hectáreas de la selva de los bayaka desde su base

en Pokola, un poblado maderero a orillas del río Sangha, decidió solicitar el certificado del FSC.

A mi parecer, la empresa habría continuado talando árboles con o sin el sello del FSC, que ofrecía una oportunidad excepcional y valiosa para proteger los derechos y recursos de los pigmeos. Yo había investigado la implementación de los principios de «consentimiento libre, previo e informado» cuando las poblaciones vulnerables se encuentran con proyectos de desarrollo en sus territorios. Por ello me contrató como asesor Tropical Forest Trust (en la actualidad Earthworm), una organización no gubernamental que la CIB había contratado para abordar las cuestiones sociales relacionadas con el certificado del FSC. La ONG me encargó un sistema para que los habitantes de las concesiones de la CIB decidiesen si permitían la explotación forestal en sus territorios.

Cuando les expliqué la importancia social y económica de los sapelis a los representantes de la CIB, les inquietó la posibilidad de un enfrentamiento con los cerca de 10.000 bayaka que poblaban sus concesiones; si se producía, el certificado del FSC sería inviable. Se sucedieron tensas reuniones entre ambas partes, donde yo actuaba de intermediario, en que las diferencias culturales se demostraron insalvables. Los bayaka no se encontraban nada cómodos en los edificios de oficinas: les intimidaban gestos en apariencia tan banales como abrir una puerta, por no mencionar los problemas para entender la finalidad de calendarios y formularios. En sus campamentos, en cambio, Emeka y otros pigmeos explicaban que los únicos sapelis que con seguridad contenían orugas eran aquellos cuyas copas sobresalían por encima de las demás. Pidieron a los taladores que los respetaran, así como los manantiales, las tumbas de sus antepasados, las arboledas sagradas, los árboles medicinales y unos pocos recursos importantes más.



1


2

Pedí, pues, a los representantes de la CIB que les ayudaran a cartografiar esos lugares y, para alivio mío, accedieron. Ingrid, que trabajaba para la sanidad pública, había diseñado una serie de iconos para que los curanderos pudieran interpretar etiquetas de medicamentos de una farmacia móvil que había puesto en marcha con ellos para tratar las lombrices, el paludismo y otras dolencias. Aquello me dio una idea. En colaboración con los bayaka y con Helveta, una empresa informática que desarrollaba herramientas para trazar cadenas de abastecimiento de materiales escasos (en este caso maderas nobles), diseñamos una interfaz pictórica para la pantalla táctil de un ordenador portátil equipado con GPS. Un bayaka se desplazaría hasta el recurso que la tribu quería preservar (un sapeli emergente, por ejemplo) y solo tendría que tocar el símbolo de la «oruga» para marcar su ubicación.

Los iconos rompieron las barreras lingüísticas y culturales. Cuando los madereros superpusieron los mapas elaborados por los bayaka sobre los sapeli que ellos habían marcado para talar, se dieron cuenta de que quedaban los suficientes para conseguir beneficios. En consenso con los indígenas y los representantes de la empresa, elaboré una serie de procedimientos para decidir las condiciones de acceso a su bosque, como llevar a las excursiones cartográficas familias enteras, pues hombres y mujeres valoran recursos distintos. En 2006, la CIB se convirtió en la primera gran maderera en conseguir un certificado del FSC duradero en la cuenca del Congo. No tardaron en seguirla otras empresas de la vasta región, con la intención de salvaguardar los derechos de los pigmeos y obtener así la certificación.

MADEREROS, FURTIVOS Y CONSERVACIONISTAS

Con los años presencié cómo todos esos esfuerzos caían en balde. Sobrecargados de trabajo, los operarios empezaron poco a poco pero de forma inexorable a relajar los procedimientos, soslayando obligaciones engorrosas (se hacían acompañar por un solo hombre bayaka en los viajes, por ejemplo) o ignorando los problemas técnicos del equipo. Así y todo, la mayoría de los recursos señalados por los pigmeos fueron respetados. Sin embargo, si estos —o yo mismo, como mediador con el mundo exterior— hubieran presagiado las graves consecuencias indirectas de la tala, se habrían desdicho.





3

LAS ANCIANAS BAYAKA NGESHE Y NGWENYE lucen en la frente barro blanco en señal de luto por la reciente muerte de su hermana, en diciembre de 2019. Privadas de su modo tradicional de vida en la selva, ahora residen cerca de Indongo, un antiguo campamento maderero *(1)*. Keyo *(a la derecha)* y una amiga permanecen sentadas sobre maquinaria forestal abandonada *(2)*. En un claro sagrado de los alrededores, Emeka, que hoy ronda la sesentena, explica cómo cuida la selva su gente *(3)*.

Antaño, cualquiera que quisiera adentrarse en la selva necesitaba un guía pigmeo, y si no contaba con el beneplácito de la tribu, no lo acompañaban. Pero la red de pistas abierta para el transporte de la madera dio acceso a los furtivos, que no cazan para consumo propio, sino para los insaciables mercados nacionales e internacionales, a zonas prístinas sin la supervisión de los pigmeos. Así dio comienzo el saqueo. El comercio de la carne de caza es tan lucrativo que surgieron redes organizadas de furtivos, a menudo financiadas por miembros de las élites, como mandos del ejército o de la policía. La multiplicación de los campamentos madereros en las profundidades de la selva atrajo a los aldeanos bantúes desde la periferia; llegaban para vender comida y prestar otros servicios a los trabajadores. Como resultado, proliferaron los barrios de chabolas con cientos de pobladores, muchos de los cuales también empezaron a cazar en busca de carne.

Los frustrados conservacionistas de la WCS, el Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF) y otras entidades respondieron a esos delitos ecológicos contratando patrullas de guardas, sin reparar en que estaban creando milicias que escapaban a su control. Muchos de ellos empezaron a expoliar la selva, en ocasiones en contubernio con las redes de furtivos; si sorprendían a los pigmeos con piezas de caza, por legales que fuesen, los apalizaban y torturaban. Cuando las organizaciones de derechos humanos dieron a conocer esos abusos en la década del 2000, las organizaciones conservacionistas se distanciaron formalmente de los guardas instando a los Gobiernos a integrarlos en el ministerio o el departamento forestal. De esta manera continuaron prestando apoyo económico y logístico, pero sin posibilidad de imponer sanciones o despedir a los infractores; así soslayaron su responsabilidad en el asunto.

En torno al 2010, las agencias de conservación empezaron a colaborar con las madereras para vigilar a los furtivos en las concesiones colindantes con las zonas protegidas. Los madereros valoraban a los guardas por el número de arrestos e incautaciones de contrabando (como la carne de caza), pero estos, incapaces de actuar contra los poderosos entramados del tráfico ilegal de fauna, escogieron objetivos fáciles: los cazadores-recolectores y los aldeanos. Pese al permiso de que gozaban para dar caza a ciertas especies con métodos tradicionales con fines de subsistencia, en la práctica, los guardas requisaban cualquier tipo de carne, como prueba de furtivismo y justificación para la intimidación, la tortura y las palizas.

Y para colmo de males, a partir de 2007, China empezó a construir carreteras y otras infraestructuras en el Congo en lugar de otra clase de concesiones, como las mineras. Cientos de trabajadores orientales llegaron para las obras, afluencia que coincidió con un gran repunte de la caza furtiva de elefantes. Las vías abiertas por los madereros conectaron con las carreteras nacionales construidas por los contratistas chinos; surgió así una fluida red de transporte para el marfil y la carne.

Los defensores de la naturaleza reaccionaron contra el auge del furtivismo «fortificando el conservacionismo» como lo describiera entre otros Victoria Tauli-Corpuz, la relatora especial de la ONU sobre derechos de los pueblos indígenas. La WCS y el WWF ampliaron los parques nacionales conectándolos entre sí con «entornos de conservación» transfronterizos como Sangha Trinational de 750.000 hectáreas, que engloba el parque Nacional de Nouabalé-Ndoki. A menudo, las agencias de desarrollo y las organizaciones de conservación, en colaboración con las industrias extractivas, continuaron diseñando nuevas áreas protegidas en la cuenca del Congo sin contar con los lugareños. El pasado marzo, los investigadores del Programa de Desarrollo informaron de que los bayaka del noroeste del Congo se quejaban de «violencia indiscriminada, intimidación y humillaciones» por parte de los guardas supervisados por el WWF, quienes los

estaban desalojando del interior del futuro Parque Nacional de Messok Dja. «Se están criminalizando las actividades cinegéticas tradicionales de los bayaka», denunciaron los investigadores.

MIEDO, HAMBRE Y ALCOHOL

Con la práctica totalidad de la selva dividida en parques protegidos y concesiones madereras, donde se les persigue por cazar y recolectar, los bayaka ya no pueden prosperar ni mantener su identidad de pertenencia al bosque. «¡Ah, estábamos bien, muy bien! ¡Miel para todos! ¡Ñames silvestres... más de los que podíamos llevar!» decía en 2003 Mongemba, el hermano mayor discapacitado de Emeka. «¡Ahora todo se ha acabado, todo acabado! ¡Solo queda tristeza! ¡Tenemos tanta hambre, y miedo, mucho miedo! Los chicos temen entrar en el bosque». Maindja, una abuela de 45 años, explicaba: «Si caminamos por la selva, nos llevan los guardas. Por eso ya no ponemos los pies en ella. Ahora nos quedamos en las aldeas, no en los campamentos. Así que la sabiduría de los antepasados está desapareciendo».

Temerosos de acampar en la selva como antaño y obligados por la necesidad, muchos bayaka vagan por los campamentos madereros o las aldeas agrícolas en busca de trabajo como braceros, empleados del hogar o curritos. La mayoría de los hombres no osan salir de caza y como el valor cultural y social del varón ha dependido tradicionalmente de su capacidad para proveer de carne y alimentar a la familia, han perdido la autoestima. Muchos son ahora trabajadores marginales, que, retribuidos a menudo con alcohol ilegal, caen víctimas de la adicción, con todos los problemas psicológicos, sociales y económicos que ello entraña. Muchas mujeres sufren violencia de género y las que viven en los alrededores de los campamentos madereros son prostituidas por los foráneos.

Desde el punto de vista pigmeo, su selva se ha convertido en una fuente de recursos de los que se apropian los extraños para beneficiarse de maneras misteriosas. La lógica del desarrollo sostenible escapa a su entendimiento: satisfacer la demanda mundial de recursos abriendo la selva a las industrias extractivas, mientras se compensa el daño con zonas protegidas militarizadas. Las madereras aseguran que la tala incesante forma parte del progreso y es fuente de prosperidad, pero los habitantes de la selva reciben un parco beneficio. Los conservacionistas señalan el daño causado a las especies en peligro por las madereras, las carreteras y las presiones del mercado para justificar tanto las vedas y restricciones draconianas que imponen a los indígenas como los abusos de los guardas. Pero la experiencia de los pigmeos es que los elefantes, leopardos, gorilas y chimpancés han dejado de ser abundantes desde la llegada de las gentes extrañas.

Y no les falta razón. Fiona Maisels, de la Universidad de Stirling en Escocia, y sus colaboradores calcularon en 2013 que la población de elefantes en la cuenca del Congo se ha reducido a poco más de un tercio desde el cambio de siglo. Los gorilas de las tierras bajas occidentales también ha disminuido sobremanera. El Servicio de Pesca y Fauna Silvestre de EE.UU. denuncia que de estas selvas se han extraído cerca de cinco millones de toneladas de animales cada año, lo que ha provocado su extinción local. Y según el Programa para el Medio Ambiente de la ONU, el 80 por ciento de los grandes mamíferos de muchos parques nacionales de la República Democrática del Congo (frontera con la República del Congo) había desaparecido para 2010.

El desencuentro entre los cazadores-recolectores y los conservacionistas obedece al conflicto entre ambas filosofías. Para los bayaka, la abundancia es el estado natural de las cosas y queda asegurada por un reparto justo entre las partes. La selva es un ser sensible con quienes mantienen relaciones sociales de cuidado y apoyo mutuos a través de tabúes, rituales, canciones y danzas. La plétora de animales que habitaba en esta región hasta época reciente testimonia el éxito a largo plazo de esta estrategia de gestión forestal. En cambio, los conservacionistas y los expertos en desarrollo representan un sistema económico mundial que cosifica la naturaleza, fomenta su mercantilización y dota a las élites del control sobre la distribución de los recursos, lo que aboca a la desaparición de los demás seres vivos.



1

UN NUEVO PARADIGMA

Pese a todo, un nuevo paradigma de conservación está arraigando en todo el mundo. Los investigadores, los activistas y otros miembros de nuestra sociedad moderna empiezan a reconocer que las poblaciones locales son las mayores protectoras de la naturaleza y tratan de ampararlas. Aunque a fin de cuentas el sistema cartográfico que diseñé con la ayuda de Emeka y de otros pigmeos no pudo salvar su modo de vida, sí se está mostrando eficaz en lugares con menos obstáculos institucionales y técnicos: aquellos con menos corrupción, más democracia y una gobernanza más sólida, o con mejor acceso a las redes de telefonía móvil.

Con el tiempo, la experiencia adquirida en la cuenca del Congo me condujo a la creación del grupo de investigación ExCiteS, en el Colegio Universitario de Londres. Desde entonces hemos desarrollado herramientas como Sapelli, una aplicación modificable para teléfonos inteligentes que recoge información sobre los recursos vitales, las actividades de los furtivos y otras variables; Geokey, un sistema de almacenamiento de datos; Com-


2

MADERA ASERRADA y troncos apilados a la espera de ser llevados aguas abajo por el Sangha, cerca del poblado maderero de Pokola, en 2019 (*1*). En otro punto del río, un camión cargado de tablazón aguarda el transbordador (*2*). Las maderas nobles congoleñas se exportan a todo el mundo.

munity Maps, que permite visualizar los datos en el contexto adecuado; y una metodología para el diseño de proyectos en conjunción con los indígenas y otras comunidades conforme a los intereses y las necesidades que ellos definen. La recogida de datos, la supervisión de los cambios y los problemas, la orientación en el modo de responder a ellos y la asociación con terceros para lograr los objetivos, sirven a las poblaciones locales como instrumentos de gestión de sus recursos.

Con tales dispositivos, los bosquimanos Ju/'hoan de Namibia están registrando y dejando constancia del acarreo ilegal de ganado por parte de sus vecinos a los abrevaderos naturales del área protegida, los mismos a los que acude la fauna que cazan; al mismo tiempo censan sus poblaciones.

En Kenia, a los masai les preocupaba la progresiva escasez de plantas medicinales en el Parque Natural Masai Mara. Para averiguar la causa, inventariaron 123 especies, de las que el 52 por ciento resultaron hallarse sanas y salvas. Señalaron al creciente número de campamentos turísticos como responsables de la mayoría de las desapariciones. En la actualidad, los masai están ampliando el proyecto al complejo forestal de Mau. La aplicación de mayor éxito es la ideada por un grupo de la Universidad de Copenhague con los habitantes del bosque de Prey Lang en Camboya, con el objeto de frenar la tala furtiva. Los voluntarios se comunican a través de teléfonos móviles para localizar las cuadrillas ilegales y, siempre en grupos multitudinarios, acuden a fotografiar y geolocalizar con Sapelli las actividades y confiscan las motosierras. Con el apoyo de los administradores locales, han puesto fin a toda la tala indiscriminada.

Todos estos esfuerzos se basan en la constatación de que muchas partes del mundo gozan de una rica biodiversidad gracias a los pobladores que habitan en ellas desde hace siglos o milenios, no a pesar de ellos. Estas comunidades son también las más ardientes defensoras del medioambiente, porque son las mayores perjudicadas por su degradación.

En mi último viaje al Congo, en diciembre de 2019, Emeka me pidió que transmitiese este mensaje a los lectores de *Investigación y Ciencia*: «Somos los guardianes de la selva. Siempre hemos estado aquí, al cuidado de ella. Desde el principio de los tiempos hemos dado muerte a los animales y ellos siempre han estado aquí para nosotros. Solo matamos para alimentar a nuestros hijos. ¡No cultivamos la tierra! ¡No pescamos! Pero los guardas nos lo impiden; nos han prohibido ir a nuestra selva... No queremos que nuestros hijos tengan que marchar lejos para encontrar animales; que solo tengan que hacerlo cerca de donde acampamos, como antes, cuando cuidábamos de ella. Han saqueado nuestro mundo. Es un problema muy serio. Queremos estar bien. ¡Pongan remedio a esto, señores, para que de nuevo podamos disfrutar de él!» IyC

PARA SABER MÁS

Managing abundance, not chasing scarcity: The real challenge for the 21st Century. Jerome Lewis en *Radical Anthropology*, vol. 6, n.º 2, págs. 11-19, 2008.
The anthropology of sustainability: Beyond development and progress. Compilado por Marc Brightman y Jerome Lewis. Palgrave, 2017.
Flourishing diversity: Learning from indigenous wisdom traditions. Jerome Lewis. Flourishing Diversity Series, 2019. **www.flourishingdiversity.com/report**
Cornered by PAs: Adopting rights-based approaches to enable cost-effective conservation and climate action. Vicky Tauli-Corpuz et al. en *World Development*, vol. 130, artículo n.º 104923, junio de 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

El conocimiento etnobotánico de los tsimane. V. Reyes García, V. Vadez y E. Byron en *IyC*, enero de 2004.
La senda del marfil. Samuel K. Wasser, William C. Clark y Cathy Laurie en *IyC*, marzo de 2010.
Salvar la biodiversidad de Birmania. Rachel Nuwer en *IyC*, enero de 2017.
Colombia: del conflicto a la economía verde. Rachel Nuwer en *IyC*, enero de 2020.

por H. Joachim Schlichting



H. Joachim Schlichting es exdirector del Instituto de Didáctica de la Física de la Universidad de Münster.

El sonido de una gota de agua

El familiar «ploc» de un grifo que gotea no se produce cuando la gota impacta contra la superficie del agua, sino debido a las vibraciones de las burbujas de aire que se forman bajo ella

Todo el mundo conoce el —en ocasiones irritante— ruido de un grifo que gotea. Sin embargo, pocos saben a qué se debe en realidad ese característico sonido. Como veremos aquí, este no se produce por el contacto con el agua, sino por las oscilaciones de las burbujas de aire que se forman cuando la gota se sumerge en el líquido.

Cuando la gota golpea contra el agua, no atraviesa inmediatamente su superficie. Al principio la deforma como si se tratara de una membrana elástica: un fenómeno que obedece a la relativamente elevada tensión interfacial que existe entre el agua y el aire. La gota solo se abre paso a través de la superficie cuando esta intenta recobrar su forma original alrededor suyo. Eso genera una pequeña cavidad en el líquido, cuya abertura se cierra antes de que el aire contenido en el interior pueda escapar (*véase el esquema*).

El aire atrapado bajo el agua enseguida da lugar a una burbuja. Y esta (a fin de ceder la mayor cantidad de energía posible al entorno, según tiende a imponer la segunda ley de la termodinámica) adopta una forma esférica, ya que dicha geometría es la que presenta una menor superficie para un volumen dado y, en consecuencia, una menor energía interfacial.

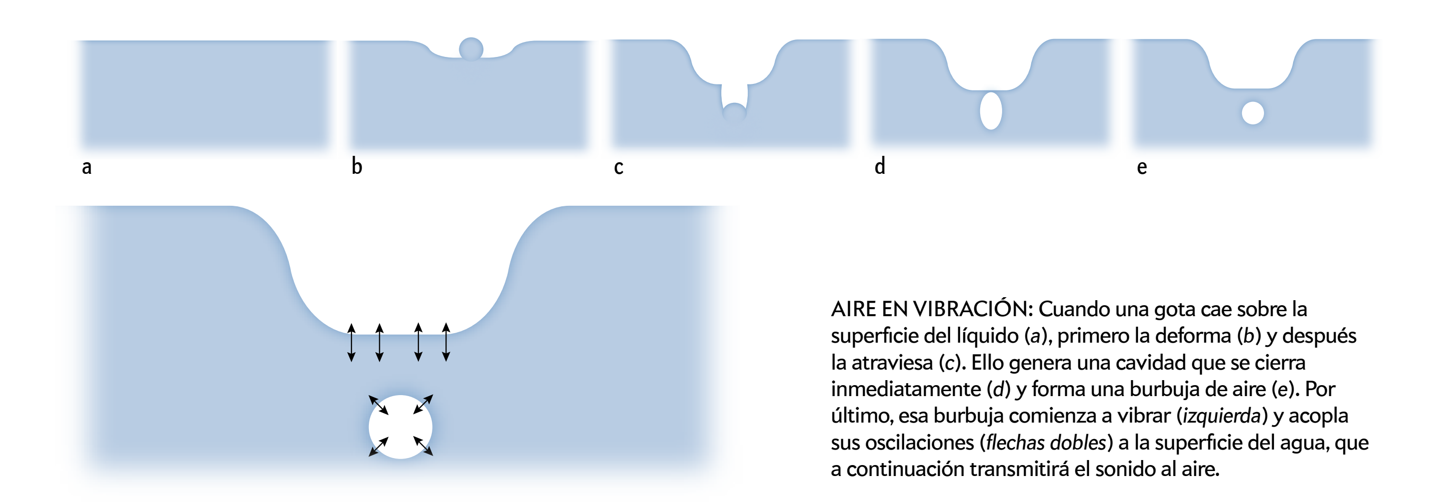
No obstante, la inercia provoca que el agua, durante unos instantes, comprima la burbuja más de lo que correspondería al estado de equilibrio. Después, ese aire comprimido volverá a expandirse, y lo hará hasta que la presión en el interior





WILFRIED SUHR, CORTESÍA DE H. JOACHIM SCHLICHTING/SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

FORMACIÓN DE BURBUJAS: Cuando una gota cae sobre el agua, deja tras de sí una cavidad de aire (*arriba*). Acto seguido, el agua se repliega sobre sí misma y se forma una burbuja (*abajo*), la cual seguirá hundiéndose durante un breve instante antes de comenzar a ascender.



AIRE EN VIBRACIÓN: Cuando una gota cae sobre la superficie del líquido (*a*), primero la deforma (*b*) y después la atraviesa (*c*). Ello genera una cavidad que se cierra inmediatamente (*d*) y forma una burbuja de aire (*e*). Por último, esa burbuja comienza a vibrar (*izquierda*) y acopla sus oscilaciones (*flechas dobles*) a la superficie del agua, que a continuación transmitirá el sonido al aire.

H. JOACHIM SCHLICHTING/SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

de la burbuja se torne ligeramente menor que la presión exterior. Estas compresiones y expansiones se repiten varias veces. Como resultado, tiene lugar una oscilación amortiguada.

Resonancias de Minnaert

Marcel Minnaert, astrónomo belga que se ocupó de analizar la física de todo tipo de fenómenos cotidianos, describió por primera vez estas «pulsaciones de volumen» en 1933. Su idea básica era que la burbuja de aire (fácilmente compresible) vibra en el seno del agua (casi incompresible), por lo que esta última actúa como la masa efectiva de un sistema masa-muelle. A partir de las ecuaciones empleadas habitualmente para describir dicho mecanismo, Minnaert logró calcular la frecuencia f de las oscilaciones.

En condiciones normales de presión (una atmósfera), y para una burbuja de aire de radio r, dicha frecuencia adopta la sencilla expresión $f \approx 3/r$ (válida cuando r se mide en metros, en cuyo caso el resultado f se obtiene en hercios). Para burbujas con radios entre 0,15 milímetros y 15 centímetros, ello implica un sonido en el intervalo audible, entre 20.000 y 20 hercios.

En ocasiones, de la burbuja principal se separan nuevas burbujas que también comenzarán a vibrar. Dado que estas últimas suelen ser de menor tamaño, producen tonos más agudos que pueden enriquecer acústicamente nuestro particular concierto.

En nuestro día a día, a menudo también observamos que una o más gotas nuevas se elevan desde la superficie del agua y vuelven a caer. Sin embargo, estas gotas secundarias carecen de la energía suficiente para producir el sonido habitual. De modo que, para obtener tonos audibles, no solo es necesario que la gota tenga un cierto tamaño, sino también que caiga desde una altura mínima. Esto puede verificarse experimentalmente con una jeringuilla desechable: si la distancia al agua no es la suficiente, podremos comprobar cómo el líquido que gotea de ella se sumerge en el agua de manera relativamente silenciosa.

Transmisión del sonido al aire

Aunque no hay dos casos iguales y cada burbuja presenta un aspecto ligeramente distinto, el patrón sonoro resulta inconfundible. En particular, puede verificarse que el tono se eleva hacia el final. Ello se debe a que la burbuja no vibra en reposo, sino que, debido a su menor densidad, asciende en el seno del líquido para regresar a la superficie. Este desplazamiento se produce a una velocidad que dependerá del tamaño de la burbuja.

En el modelo masa-muelle, la masa efectiva alrededor de la burbuja disminuye a medida que esta se acerca a la superficie, lo que provoca que la frecuencia del sonido emitido aumente. Cuando una burbuja que está sumergida a una profundidad de unas diez veces su radio sube hasta justo debajo de la superficie, el tono del sonido se incrementa aproximadamente en un factor de raíz de dos. Esto también puede comprobarse con un sencillo experimento: si soplamos a través de una pajita en un recipiente de agua, observaremos que el burbujeo produce tonos considerablemente más altos cuando tiene lugar justo bajo la superficie, y más bajos cuando ocurre a una profundidad mayor.

Durante largo tiempo, los físicos dieron por sentado que el sonido simplemente se transportaba a través del líquido primero y a través del aire después hasta llegar a nuestros oídos. En 2018, sin embargo, un grupo de la Universidad de Cambridge demostró que el proceso es en realidad algo más complejo. Las vibraciones de la burbuja sumergida se acoplan directamente a la parte más cercana de la superficie del agua, la cual actúa como una especie de membrana oscilante que transmite el sonido al aire de manera eficaz y sin apenas distorsiones.

Cuando la gota golpea contra la superficie del agua suceden más fenómenos. Por ejemplo, aparecen pequeñas ondulaciones que se propagan en dirección radial desde el punto del impacto. Sin embargo, estas «ondas capilares» son demasiado lentas para producir un tono audible. Otros efectos acústicos adicionales tampoco contribuyen demasiado al sonido característico.

En definitiva, la tensión interfacial del agua desempeña un papel clave en el fenómeno. Y esto sugiere un sencillo método para mitigar el sonido de un grifo que gotea y que no conseguimos cerrar: añadir un poco de lavavajillas reducirá la tensión del agua subyacente... y, con suerte, también la nuestra.

PARA SABER MÁS

On musical air-bubbles and the sounds of running water. Marcel Minnaert en *Philosophical Magazine*, vol. 16, págs. 235-248, 1933.

The sound produced by a dripping tap is driven by resonant oscillations of an entrapped air bubble. Samuel Phillips, Anurag Agarwal y Peter Jordan en *Scientific Reports*, vol. 8, art. 9515, junio de 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

La interfase gas-líquido. Claudi Mans, Joan Llorens y José Costa López en *IyC*, enero de 1988.

¿Estallidos sónicos en la bañera? Davide Castelvecchi en *IyC*, julio de 2010.

por Patrick Honner

Patrick Honner es profesor de matemáticas y computación en un instituto de secundaria de Brooklyn, Nueva York. Reconocido divulgador, en 2013 recibió el Premio Presidencial a la Excelencia en la Enseñanza de Matemáticas y Ciencias de EE.UU.



Sucesiones sin regularidades

La dificultad matemática de medir el tamaño de un conjunto carente de pautas

He aquí un juego muy sencillo para entretenerse en un día lluvioso: usted y su oponente escriben en un papel los números del 1 al 9 y se turnan para tacharlos; el vencedor será el último que elimine un número sin que eso suponga haber tachado tres seguidos. ¡Juguemos! Puede empezar usted.

Supongamos que, tras cuatro turnos, la situación es la siguiente:

1 2 ~~3~~ 4 ~~5~~ 6 7 ~~8~~ ~~9~~

Ahora vuelve a tocarle a usted. Si tacha el 4 perderá, ya que eso eliminará tres cifras seguidas (3, 4 y 5). Y lo mismo ocurre si tacha el 7. Así que sus únicas posibilidades son eliminar el 1, el 2 o el 6. Pero, elija el que elija, yo siempre podré tachar después uno de los otros dos, tras lo cual usted se quedará sin opciones válidas.

Acabamos de presentar un juego muy simple tras el que se esconden algunas matemáticas interesantes. ¿Qué estrate-

BIG MOUTH/QUANTA MAGAZINE

gias podemos seguir para ganar? Una posibilidad es ir creando huecos para que el oponente no tenga otra opción que completar una fila de tres números tachando el del centro; por ejemplo:

~~1~~ 2 ~~3~~ 4 ~~5~~ 6 ~~7~~ 8 ~~9~~

Otra técnica consiste en tachar los números contiguos a los que haya eliminado nuestro contrincante, para así forzarlo a completar una fila de tres por la derecha o por la izquierda, como aquí:

1 ~~2~~ ~~3~~ 4 ~~5~~ ~~6~~ 7 ~~8~~ ~~9~~

Sin embargo, con independencia de cómo juguemos, hay algo seguro: después de seis turnos, alguien tendrá que haber ganado. Esto se debe a que es imposible tachar siete de los nueve números sin eliminar tres seguidos (si no me cree, haga pruebas en un papel hasta convencerse). En este caso, decimos que seis es la «cota superior» al número de turnos totales que admite el juego.

Por tanto, y aunque en una situación dada no sepamos cuál es nuestra mejor opción, sí podemos asegurar que la partida nunca durará más de seis rondas. Esta idea puede generalizarse. Si jugamos con los números del 1 al 15, la partida no podrá alargarse más allá de los diez turnos. Y en general, si el número total de cifras es un múltiplo de 3, solo podremos tachar un máximo de 2/3 de ellos.

Encontrar una cota superior al número de turnos constituye un paso importante para entender las propiedades matemáticas de nuestro juego. Por ejemplo, tal vez esa cota nos permita encontrar una estrategia ganadora. O puede que nos sirva como punto de partida para entender lo que sucede cuando la cantidad total de cifras no es un múltiplo de 3. Y aunque conocer esa cota superior tal vez no parezca gran cosa, es mucho más de lo que podemos decir sobre otros juegos muy similares.

Progresiones aritméticas

Por ejemplo, cambiemos las reglas del juego para que ahora el perdedor sea el primero que tache tres números equidistantes, sea cual sea el tamaño del intervalo que medie entre dos de ellos. Eso quiere decir que perderemos si tachamos los números 2-3-4, al igual que antes, pero también si eliminamos 1-3-5 (ya que la distancia entre dos números consecutivos es siempre dos) o 1-4-7 (distancia igual a tres). Tales listas son progresiones aritméticas: sucesiones de números donde la diferencia entre dos elementos consecutivos se mantiene constante.

Volvamos a nuestra tabla inicial del 1 al 9 y juguemos con las nuevas reglas. Supongamos que la situación es la siguiente y que le toca a usted:

1 2 ~~3~~ 4 ~~5~~ 6 7 ~~8~~ ~~9~~

Debe saber que ya ha perdido. Si tacha el 1, obtendrá la progresión aritmética 1-3-5; si se decide por el 2, tendrá 2-5-8; el 4 crea la sucesión 3-4-5; el 6, 3-6-9; y el 7, 7-8-9. Haga lo que haga, es imposible no completar una progresión aritmética. Las nuevas reglas nos obligan a tener en cuenta muchas más situaciones. Y como consecuencia, el juego se complica de manera considerable y resulta mucho más difícil hallar una cota superior al número de turnos que durará una partida.

Para los matemáticos, la diversión está en convertir un simple juego con números en un juego contra las matemáticas mismas. El objetivo es averiguar cuánto puede durar una partida cuando comenzamos con una lista de cualquier tamaño. En otras palabras: dada una lista de números de longitud arbitraria, ¿cuántos podemos tachar antes de que entre los eliminados aparezca una progresión aritmética? Las reglas parecen simples, pero hoy por hoy nadie conoce la respuesta. Y sabemos aún menos sobre otras variantes. Juguemos un poco más y veamos a dónde nos llevan las matemáticas.

Conjuntos de Salem-Spencer

En el juego que acabamos de describir, una serie de turnos válidos constituye esencialmente un «conjunto de Salem-Spencer»: un subconjunto de {1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9} que no contiene progresiones aritméticas (el nombre de estos conjuntos se debe a los matemáticos Raphaël Salem y Donald Spencer, quienes los estudiaron en los años cuarenta del pasado siglo). Así pues, la cota superior que buscábamos no es más que el tamaño del mayor subconjunto de Salem-Spencer que podemos encontrar en nuestra lista de números. Sin embargo, hallar las jugadas que nos permiten llegar hasta él puede resultar muy difícil. Veamos por qué.

Comencemos de nuevo. Tras los dos primeros turnos, nadie puede haber perdido, así que supongamos que los números que hemos tachado son el 3 y el 5:

1 2 ~~3~~ 4 ~~5~~ 6 7 8 9

Ahora hemos de elegir un tercer número; es aquí donde tenemos que empezar a prestar atención. Al igual que en la primera versión del juego, hemos de impedir que se forme una progresión aritmética tanto entre los dos primeros números como a cada uno de sus lados. Por ejemplo, no podemos tachar el 4, ya que esto nos daría la progresión 3-4-5. Y tampoco podemos eliminar el 1, pues obtendríamos 1-3-5; ni el 7, pues eso nos daría 3-5-7. Dado que el 8 sí es una posibilidad, supongamos que ese es nuestro próximo movimiento:

1 2 ~~3~~ 4 ~~5~~ 6 7 ~~8~~ 9

Las cosas están a punto de complicarse. Nuestro objetivo sigue siendo el mismo: impedir que aparezca una progresión aritmética entre dos de los números ya seleccionados o a cualquiera de sus lados. Pero ahora hay muchas más posibilidades que debemos tener en cuenta, ya que hemos de considerar tres parejas de números.

Por un lado, sabemos qué podemos esperar. Para cada pareja posible de números hemos de evitar generar una progresión entre ellos o a sus lados. Pero las cosas ya no son tan predecibles como querríamos. El 3 y el 5 eliminan tres opciones: 1, 4 y 7. Pero el 3 y el 8 no suprimen ninguna, ya que los números que deberíamos evitar (−2, 5,5 y 13) ni siquiera están la lista. Y el 5 y el 8 solo eliminan el 2, ya que ni el 6,5 ni el 13 son posibles.

Por tanto, cada elección que tomemos eliminará algunas opciones, pero cuántas sean estas dependerá de lo que elijamos. Esa irregularidad hace que resulte muy difícil contar todas las posibilidades y hallar una cota superior al número de turnos de nuestra partida.

Sigamos jugando. Una opción legítima es el 6, así que procedamos a tacharlo:

1 2 ~~3~~ 4 ~~5~~ ~~6~~ 7 ~~8~~ 9

Aquí termina nuestra partida. Ya sabemos que 1, 2, 4 y 7 pierden. Y tachar el 9 genera la progresión aritmética 3-6-9, por lo que no caben más opciones: hemos llegado tan lejos como podíamos.

Lo anterior demuestra que la colección de números {3, 5, 6, 8} es un conjunto de Salem-Spencer. Pero ¿es el mayor de todos los posibles? Sabemos que este conjunto concreto no puede agrandarse. Pero ¿tal vez una estrategia distinta nos hubiera permitido encontrar uno mayor? En otras palabras: ¿contiene el conjunto

Tamaño de la lista {1, 2, 3 ,..., *n*}	Tamaño del máximo subconjunto de Salem-Spencer
1	1
2	2
3	2
4	3
5	4
6	4
7	4
8	4
9	5
10	5
11	6
12	6
13	7
14	8
15	8
16	8
17	8
18	8
19	8
20	9

{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9} algún subconjunto de más de cuatro elementos que no incluya progresiones aritméticas de tres términos?

La respuesta es afirmativa: {1, 2, 6, 8, 9}. Este subconjunto corresponde a cinco turnos válidos de nuestro juego y, por tanto, es un conjunto de Salem-Spencer. Y sabemos también que es máximo, ya que, para la lista inicial {1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9}, es posible demostrar que el mayor conjunto posible de Salem-Spencer tiene cinco elementos. No obstante, si partimos de la lista de los n primeros números naturales, {1, 2, 3, ..., n}, la respuesta no siempre estará tan clara. De hecho, hoy por hoy solo sabemos qué ocurre para $n \leq 209$.

Secuencias polinómicas

A los matemáticos les encantaría saber el tamaño exacto del mayor subconjunto posible de Salem-Spencer para la lista {1, 2, ..., n}. Pero, en general, lo máximo que han conseguido es establecer algunas cotas. Pero incluso esto resulta considerablemente difícil, debido en parte a las irregularidades de las que hablábamos antes: tachar un número puede eliminar de golpe muchas opciones, pero otras veces solo suprimirá unas pocas.

Tales irregularidades quedan patentes en la tabla adjunta, donde se muestra el tamaño del mayor subconjunto de Salem-Spencer para varios valores de n. En nuestro juego, donde $n = 9$, el máximo subconjunto de Salem-Spencer tiene tamaño 5. Pero si añadimos el 10 a la lista, eso no aumenta el tamaño del subconjunto correspondiente de Salem-Spencer, que sigue siendo 5. En cambio, al pasar de 12 a 13 y de 13 a 14, el tamaño máximo cambia de 6 a 7 y de 7 a 8, respectivamente. Y después, tendremos que añadir otros seis números para que el tamaño del máximo subconjunto de Salem-Spencer aumente en una unidad.

Dos resultados clásicos en este campo, conocidos como teorema de Roth y teorema de Szemerédi, permiten establecer cotas al tamaño de tales conjuntos, a menudo mediante el empleo de técnicas matemáticas avanzadas como la teoría ergódica y las transformadas de Fourier. Y hace unos años, el medallista Fields Timothy Gowers reanalizó el teorema de Szemerédi y encontró una importante cota superior al tamaño de los conjuntos que no contienen progresiones aritméticas de longitud k. Pero, si queremos calcular la cota superior para nuestro juego, donde $n = 9$ (el tamaño de nuestra lista de números) y $k = 3$ (la longitud de las progresiones aritméticas que intentamos evitar), una parte de nuestro cálculo implicaría evaluar 2^{4096}, ¡un número de más de 1200 dígitos!

Aunque nada de lo anterior resulta tremendamente útil para la vida cotidiana, este tipo de cotas proporcionan un cierto control matemático sobre algunos conjuntos que aún no se entienden bien. Por ejemplo, hasta hace poco no existían cotas similares para las secuencias polinómicas: generalizaciones de las progresiones aritméticas con sumas y potencias, como por ejemplo:

$$2+3,\ \ 2+3^2,\ \ 2+3^3, \ldots$$

Tales secuencias son más complejas que las progresiones aritméticas, lo que hace que el juego consistente en elegir subconjuntos libres de ellas resulte mucho más difícil de analizar. Con todo, establecer una cota superior al tamaño máximo de dichos conjuntos nos deja un paso más cerca de entenderlos, que es el objetivo que persiguen los matemáticos cada vez que se enfrentan a un juego de números.

Este artículo apareció originalmente en QuantaMagazine.org, una publicación independiente promovida por la Fundación Simons para potenciar la comprensión pública de la ciencia



PARA SABER MÁS

A new proof of Szemerédi's theorem. W. Timothy Gowers en *Geometric & Functional Analysis*, vol. 11, págs. 465-588, agosto de 2001.

Mathematicians catch a pattern by figuring out how to avoid it. Kevin Hartnett en *Quanta Magazine*, 25 de noviembre de 2019.

José Manuel Sánchez Ron es miembro de la Real Academia Española y catedrático emérito de historia de la ciencia en el Departamento de Física Teórica de la Universidad Autónoma de Madrid.



HISTORIA DE LA CIENCIA

Rudolf Virchow, activista médico y social

El padre de la teoría celular fue también un gran reformador de la salud pública

José Manuel Sánchez Ron

El siglo xix fue decisivo para la renovación de la medicina. La fisiología, la teoría microbiana de algunas enfermedades, la vacunación, la afirmación de la teoría celular, la introducción de la anestesia y los cuidados basados en la asepsia cambiaron radicalmente la medicina, haciéndola más segura y científica. Asociados a estos avances se hallan nombres como los de Johannes Müller, Hermann von Helmholtz, Claude Bernard, Louis Pasteur, Robert Koch, Joseph Lister, Santiago Ramón y Cajal, Edward Jenner, Ignaz Semmelweis y Rudolf Virchow (1821-1902).

Virchow hizo de la fisiología patológica su principal hogar científico. Entre sus descubrimientos se encuentran los de la leucemia y la mielina, y realizó estudios experimentales fundamentales sobre la trombosis, la flebitis o la triquinosis. Como patólogo, para averiguar dónde residían los problemas, los males, en los tejidos de los órganos de los enfermos, Virchow basó sus trabajos en un viejo instrumento, el microscopio, que en el siglo xix abrió nuevas puertas a la observación gracias a los avances técnicos que experimentó. Considerado el auténtico «padre» de la teoría celular, el lugar en el que presentó de manera completa sus ideas y resultados es uno de los grandes libros de la medicina del siglo xix: *Die Cellularpathologie in ihrer Begründung auf physiologische und pathologische Gewebelehre* («La patología celular basada en la histología fisiológica y patológica»), publicado en 1858. Nadie antes que Virchow había defendido con tanta fuerza, y apoyándose en todo tipo de hechos, el papel central de la unidad celular en la vida. «Al igual que un árbol constituye una masa dispuesta de una manera definida», escribió allí, «en la que, en todas sus partes, en las hojas al igual que en las raíces, en el tronco al igual que en los brotes, se descubre que las células son los elementos últimos, así ocurre con todas las formas de vida animal. *Todo animal se presenta como una suma de unidades vitales*, cada una de ellas manifestando todas las características de la vida.»

Cartas al padre: la formación de Virchow

Natural de la pequeña ciudad de Schivelbein, que formaba parte de Pomerania (Prusia), la familia de Virchow no disponía de medios económicos suficientes para que su brillante hijo único pudiese estudiar una carrera universitaria. Sin embargo, existía una posibilidad: la escuela de medicina del ejército de Prusia, el Instituto Friedrich-Wilhelms de Berlín (también conocido como la Pépinière), fundado en 1795, proporcionaba educación gratuita (más un pequeño salario) a algunos alumnos destacados a cambio de que cuando finalizasen sus estudios se uniesen al ejército en calidad de médicos. Por cada año que los alumnos pasasen en el Instituto debían servir dos en el ejército prusiano. En consecuencia, después de completar un año como internos en el Hospital de la Charité y pasar los correspondientes exámenes, estaban obligados a ocho años de servicio militar. En 1839, Virchow superó el examen y en octubre entró en la Pépinière.



RUDOLF LUDWIG KARL VIRCHOW, 1891.

Situado en el centro de Berlín, el Instituto estaba estrechamente asociado a la Facultad de Medicina de Berlín y a la Charité, la institución para la educación médica más antigua de Prusia (fue fundada en 1710).

Gracias a las cartas que el joven Virchow envió a su padre, Carl Christian Siegfried Virchow (1785-1865), es posible obtener datos sobre la formación del futuro patólogo y reformador médico. Así, en una carta fechada el 5 de diciembre de 1839, Rudolf le explicaba la dureza de las lecciones y prácticas de anatomía, una información que sirve para apreciar cómo eran estas enseñanzas en aquella época:

Por último, respondiendo a su tercera pregunta relativa a la disección de cadáveres, no hemos llegado a eso todavía. Como le escribí en mi última carta, asisto a las lecciones de anatomía todos los días de 2 a 3 de la tarde. Por supuesto, solo se utilizan para esto ejemplares frescos, ya que sería imposible mostrar los músculos (esto es, la carne del cuerpo humano) de un cuerpo que es viejo, seco o conservado en alcohol. A veces únicamente hay cabezas, otras brazos o piernas, un tronco cortado, parte de una espalda con un pierna o parte del pecho con un brazo; en resumen, todas las variaciones posibles. El problema es que los cadáveres ahora escasean. De los 150 estudiantes que se supone que deben diseccionar, solamente 70 pueden mantenerse ocupados durante la semana, y con mucha frecuencia entre 8 y 15 trabajan en un mismo cuerpo. Por el mismo motivo, incluso el profesor [Johannes] Müller no puede variar sus ejemplares con la suficiente frecuencia, sino que tiene que trabajar con el mismo el mayor tiempo posible. Actualmente tenemos lecciones de anatomía cada día de 7 a 8 de la mañana en el Instituto, y utilizamos las mismas muestras que ha empleado el profesor para su clase magistral del día anterior. En ocasiones, si se necesita una parte del cuerpo de mayor tamaño, que evidentemente es demasiado pesada para ser transportada, tomamos las clases en el propio Instituto Anatómico. En estas clases, el cirujano jefe docente acude a un alumno y le pide que haga él la demostración de la muestra. Pero si sucede que los músculos se hallan demasiado profundos, bajo dos o tres capas de otros músculos, evidentemente tiene que doblar estos hacia atrás a fin de poder mostrar los músculos de interés. Recientemente también ha sucedido que Müller impartió su clase magistral sobre los músculos utilizando una única cabeza durante toda la semana, y como el tiempo fue caluroso durante esa semana, la cosa apestaba de manera horrible. Durante una clase, el cirujano jefe docente me pidió que mostrase un músculo muy profundo del interior de la garganta. No hace falta que diga que tuve que girar la cabeza, o más bien el cráneo, boca abajo y luego meter mi mano a través de la garganta en la cavidad faríngea. Puede imaginarse el olor tan horrible que surgía de la garganta. No obstante, recientemente hemos tenido un olor aún peor. Müller levantó los músculos de la espalda y del abdomen, y utilizó para hacerlo un cuerpo entero cuyas piernas habían sido seccionadas por la mitad de los muslos. Estuvo enseñando sobre esto desde el martes hasta el sábado, y el lunes tuvimos repaso. El aspecto de la muestra era digno de ver; ¡el cuello estaba desgarrado, hecho jirones, el pecho yacía abierto, el abdomen colgaba en piezas y los intestinos sobresalían! Pero el olor era aún peor. Incluso el cirujano jefe, que estaba explicando la teoría de las hernias sobre el abdomen medio putrefacto, luchaba en varias ocasiones por respirar. No puedo decir que me espantase semejante visión; es solo el olor lo que me perturba, porque es insoportable. Pero puesto que es inevitable, me aguanto. No necesita preocuparse por esto.

Vemos en esa carta que Virchow fue alumno de Johannes Müller (1801-1858), el maestro de una generación de científicos que cambiaron la fisiología (entre sus discípulos, además de Virchow, se cuentan figuras como Helmholtz, Emil du Bois-Reymond, Ernst Brücke, Carl Ludwig y Jakob Henle). Antes incluso de los exámenes finales, Virchow fue nombrado «cirujano de compañía (militar)» en la Charité. Allí se inició en la práctica médica, parece que con éxito entre los pacientes, que le llamaban «el pequeño doctor». El 17 de marzo de 1843 escribía a su padre contándole sus experiencias:

Debido a la enfermedad y temprana jubilación de un colega de la sección sénior, se produjo en la Pascua de Resurrección una vacante para un cirujano en la Charité y era obvio que debía ser ocupada por alguien de nuestra sección, que se encuentra ahora en su último semestre. Me preguntaron si estaba dispuesto a aceptar esta prestigiosa oferta, y después de algunas dudas decidí aceptarla con la condición de que se me permitiese continuar en la Charité año y medio. Hoy informé al Generalarzt Lohmayer, que se encarga de los asuntos personales de los médicos militares, y al Hausstabsarzt de la Charité, de quien supe que había sido destinado a la sala de pacientes de ojos, la denominada clínica ocular, encabezada por el famoso oftalmólogo Jünken. Esta noticia fue muy satisfactoria porque a pocos de nosotros nos asignarán a esta sala en concreto, y esta rama de la medicina se está convirtiendo ahora en mi principal interés. A partir de mañana me uniré a las rondas de la mañana y de la tarde para familiarizarme con los pacientes actuales y los asuntos de la clínica, y el 1 de abril efectuaré definitivamente el cambio. De esta forma me perderé un agradable semestre durante el cual pienso que habría llenado grandes vacíos en mi conocimiento teórico; me pierdo cursos clínicos de maestros renombrados y el tiempo para preparar con calma mis exámenes. Pero espero que la ganancia no será insignificante y los beneficios materiales superarán todo lo demás.

Ahora estoy interesado en obtener un doctorado tan pronto como sea posible ya que, cuando uno se halla entre un gran número de colegas graduados, no disponer de un título resulta en una desagradable discriminación [...] Por este motivo, querría preguntarle que me dijese definitivamente si podría enviarme el dinero necesario en julio, cuando nos darán permiso para doctorarnos.

«La medicina es una ciencia social, y la política no es nada más que medicina a gran escala.»

Disponiendo ya de alguna experiencia, el 7 de abril explicaba a su padre sus quehaceres clínicos:

Mi posición personal es perfectamente satisfactoria [...] Mis pacientes, en este momento 29 en total, están acomodados en dos grandes salas y en dos habitaciones pequeñas; han asignado a mi servicio tres enfermeros y una enfermera. Dos veces al día, a las 9 por la mañana y a las 5 por la tarde, acompaño al Stabsarzt [oficial médico] en sus rondas mientras prescribe los tratamientos. Antes de estas rondas visito por mi cuenta a pacientes para estudiar su situación, cambiar sus vendas, etc. Además, cada mañana tenemos que ocuparnos de la denominada clínica ambulatoria, donde los pacientes de ojos de la ciudad buscan nuestra ayuda y tratamiento y después regresan a su casa. También hay que ocuparse de mucho papeleo: informes diarios, mensuales y cuatrimestrales, registros diarios de pacientes, y otras cosas del estilo; el volumen de todo esto puede medirse por el hecho de que en el último año diecinueve médicos de la Charité utilizaron 36.000 hojas con membrete. Aunque esta cifra no parece desmedida considerando que actualmente son 1036 los pacientes del hospital.

Teniendo en cuenta que trabajaba en una clínica de ojos, no es sorprendente que cuando, también en 1843, obtuvo el título de doctor en medicina (dirigido por el propio Müller, que era entonces el decano de la Facultad de Medicina), su tesis —en latín, siguiendo la costumbre de entonces— se titulase *Sobre la enfermedad reumática, particularmente de la córnea*.

Tal y como deseaba, la estancia de Virchow en la Charité se prolongó. En otra de sus cartas a su padre, esta del 15 de octubre de 1845, le explicaba cuál era su situación:

La siguiente meta que me he propuesto es ganar reconocimiento general a través de una serie de publicaciones. Le adjunto mi primer artículo sobre la fibrina, el componente de la sangre que permite que se coagule [...]

Entre tanto, debo completar los exámenes estatales. La posibilidad de fracasar originaría, por supuesto, un terrible problema. Una vez que haya terminado los exámenes, mi situación en la Charité, donde, por cierto, pronto tendré mi propia habitación, cambiará, si no formalmente, sí al menos de facto. Como le escribí anteriormente, intentaré el próximo verano dar clases privadas, y, si es posible, también que se me asignen algunos pacientes para que les atienda personalmente. De esta forma, acaso pueda extender mi estancia en la Charité, aunque esta esperanza sea pequeña. De cualquier manera, la opción estaría siempre abierta, incluso en el futuro, de solicitar un tratamiento preferencial en lo militar; de hecho, incluso podría pedir la baja anticipada con una buena posibilidad de que se me aceptase si se me ofreciesen otras perspectivas más favorables.

Activista social y médico

La carrera de Virchow estaba comenzando. Y lo haría con rapidez. En 1847 se convirtió en *Privatdozent* (habilitado para dar clases pero sin recibir de la universidad más salario que el procedente de los estudiantes que se matriculasen en los cursos que ofreciera) en Berlín. Su conferencia inaugural, que presidió Müller, versó sobre la osificación patológica, y su clase de prueba, sobre la inflamación muscular. En el invierno de aquel mismo año se declaró una terrible epidemia de tifus que devastó la Alta Silesia. Virchow recibió el encargo de estudiar la situación, por lo que permaneció en la zona entre el 20 de febrero y el 20 de marzo. Aquella experiencia despertó su conciencia social, haciendo de él un activista en defensa de una salud pública eficiente. Acuñó entonces el aforismo: «La medicina es una ciencia social, y la política no es nada más que medicina a gran escala.»

Acababa de regresar de Silesia cuando estalló en Berlín una revolución, la Revolución de 1848, cuyos objetivos eran el Gobierno prusiano, las autoridades municipales e incluso el rey. Virchow describió la situación detalladamente a su padre el 19 de marzo, sin dejar de señalar que «Mi participación en el levantamiento fue relativamente insignificante. Ayudé a levantar algunas barricadas. Pero entonces, como no pude conseguir una pistola, no me fue posible hacer mucho, ya que los soldados disparaban desde muy lejos, y, dado el pequeño número de ciudadanos, el combate mano a mano era imposible, al menos en mi barricada.» Finalmente, los revolucionarios fueron derrotados, y Virchow, expulsado de la Charité. Sin embargo, el año siguiente obtuvo su primera cátedra, de anatomía patológica, en la Universidad de Wurzburgo.

Su actuación en 1848 muestra que, además de un gran científico, Virchow fue también un hombre con intensas preocupaciones sociopolíticas, entre las que figuraba la situación de la salud pública en Alemania. Es significativa en este sentido una serie de artículos sobre las reformas médicas en la salud pública que publicó en 1848 en *Die Medizinische Reform*. Esta revista semanal, que él mismo fundó junto al psiquiatra Rudolf Leubuscher, se convirtió en portavoz de un movimiento nacional de reforma médica que abogaba por un progreso administrativo que se correspondiese con, y pudiese explotar, los avances científicos. Allí, en el número de septiembre, defendió ideas que muestran lo poco humanitaria que era la época en que lo escribió: «En lo que se refiere a la frase "para cada uno según sus necesidades", en ningún lugar se aplica con mayor claridad y rotundidad que en la atención que se brinda en la salud pública, de la que constituye uno de sus principios básicos. La admisión en un hospital debe estar abierta a todo paciente que lo necesite, con independencia de si es judío o ateo. Si alguien solicita la admisión, el único criterio debe ser si está enfermo, y qué circunstancias justifican su admisión en un hospital. Hasta ahora, sin embargo, era lo contrario; la primera pregunta era si la persona podía pagar, o si alguna otra persona era responsable de pagar por ella». ■

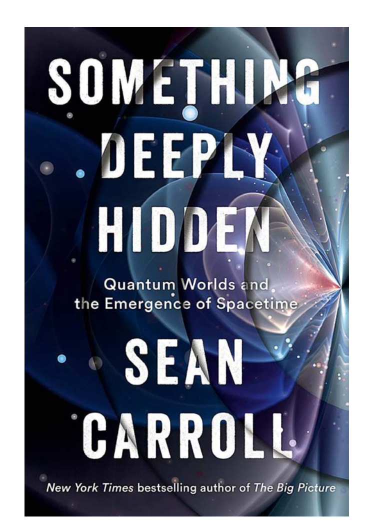
PARA SABER MÁS

Rudolf Virchow. Doctor, statesman, anthropologist. Erwin H. Ackerknecht. The University of Wisconsin Press, 1953.

Rudolf Virchow. Letters to his parents, 1839 to 1864. Dirigido por Marie Rabl. Science History Publications, 1990.

EN NUESTRO ARCHIVO

Rudolf Virchow (1821-1902). J. M. López Piñero en *MyC*, nº. 18, 2006.



SOMETHING DEEPLY HIDDEN
QUANTUM WORLDS AND THE EMERGENCE OF SPACETIME
Sean Carroll
Dutton, 2019
368 págs.

¿Mecánica cuántica o misticismo cuántico?

Una defensa enérgica pero cuestionable de la interpretación de los muchos mundos

De entre todas las teorías científicas, la mecánica cuántica ha corrido una suerte peculiar. Teniendo a su favor las comprobaciones experimentales más espectaculares de la historia, aglutina todavía un número significativo de descontentos. Una razón para ello es, sin duda, que sus consecuencias parecen no adaptarse a nuestro «sentido común». Pero también hay una causa histórica. Entre la primera generación de críticos se encontraron algunos grandes nombres de la física del siglo xx; entre ellos, varios de los creadores de la teoría. Especial influencia tuvieron las críticas de Erwin Schrödinger, con su célebre gato, y las de Albert Einstein, cuyo escepticismo condujo a la identificación del más cuántico de todos los fenómenos físicos: el entrelazamiento.

Mientras que en el caso de otras teorías revolucionarias los éxitos y el tiempo acaban por acallar a los críticos, con la mecánica cuántica estos persisten tras casi un siglo desde su formulación. El núcleo del «problema» está claramente en que, a diferencia de la mecánica clásica, es imposible predecir los resultados de una medida cuántica con total certeza, ni siquiera cuando nuestro conocimiento del sistema es exhaustivo. Desde un punto de vista histórico, es precisamente esta naturaleza no determinista (verificada experimentalmente de forma repetida) la que hace de la mecánica cuántica la teoría que inaugura la física del siglo xx. Por contraste, la relatividad especial y general, ambas nacidas también a principios del pasado siglo, pueden considerarse en más de un sentido como la culminación de la física determinista del siglo xix.

Los intentos de «purgar» la mecánica cuántica de su carácter intrínsecamente probabilístico condujeron a la formulación de las teorías de variables ocultas. El fracaso experimental de estas ha desplazado la atención a la llamada interpretación de muchos mundos (IMM). Su origen se remonta al trabajo de Hugh Everett en los años cincuenta, aunque su versión actual debe mucho a la formulación de otros físicos posteriores. La IMM elimina el carácter estocástico de los fenómenos cuánticos de un plumazo: la evolución de la función de onda es siempre determinista y, como consecuencia de una medida, todos los posibles resultados de esta se realizan, aunque en diferentes «mundos» completamente desconectados entre sí. Los conocedores del universo narrativo de Jorge Luis Borges habrán sin duda notado ya las resonancias con su relato de 1944 *El jardín de caminos que se bifurcan*.

La IMM ha encontrado especial eco en la divulgación científica contemporánea. Recordemos títulos como *La realidad oculta*, del físico teórico Brian Greene (Crítica, 2016), o *Nuestro universo matemático* (Antoni Bosch, 2015), del también físico Max Tegmark. La incorporación más reciente a esta lista es *Something deeply hidden*, el último libro de Sean Carroll, cosmólogo y físico teórico del Instituto de Tecnología de California. En él, el autor se propone convencer al lector de que la IMM no solo es la descripción más pura del mundo cuántico, sino también la más económica desde el punto de vista explicativo.

Difícil tarea, sin duda, defender la economía de un formalismo que asume la creación de un número ingente de mundos inobservables cada vez que se produce una medida cuántica. Carroll comienza con una presentación de la mecánica cuántica que, bajo el nombre de «interpretación de Copenhague», resalta el llamado postulado del colapso de la función de onda como una adición artificial. Este establece que, al efectuar una medición, la función de onda «se proyecta» sobre el estado asociado al resultado, cuya probabilidad queda dada por la regla de Born.

A esto Carroll contrapone lo que denomina «la mecánica cuántica austera», la cual, renunciando al colapso de la función de onda, simplemente contempla su evolución temporal mediante la ecuación de Schrödinger. Al realizar una medida, la función de onda se ramifica. Y como consecuencia de la interacción entre el sistema y el medio, esta acabará describiendo la superposición de tantos «mundos» (con sus correspondientes observadores) como resultados posibles implique la medida.

Puede que esta sea una visión muy austera de los procesos cuánticos; sin embargo, no explica el aspecto más importante del que debe dar cuenta toda teoría física: los resultados de los experimentos. Y es precisamente al intentar hacer esto que la IMM pierde todo atisbo de austeridad. Recuperar la regla de Born no solamente requiere cambiar el punto de vista sobre lo que significa la probabilidad. El verdadero problema radica en encontrar una manera de calcular la probabilidad de que el observador se encuentre en una u otra rama de la función de onda. Para conseguirlo, es necesario introducir criterios adicionales, como los «principios de racionalidad» que deben aplicar los observadores para localizarse en el espacio de funciones de onda.

Una de las críticas básicas del libro a la interpretación de Copenhague es que esta debe asumir la existencia de observadores clásicos, separados del sistema cuántico bajo estudio. Pero ¿es esto realmente un problema? La mecánica cuántica, como cualquier otra teoría física, es la forma que tenemos de explicar el mundo que observamos y, por tanto, su misión es poner orden en nuestras percepciones, ya sean estas directas o mediadas por instrumentos. De hecho, este es el objetivo último de toda descripción científica del universo.

Carroll nos recuerda que en el universo primitivo no había observadores que realizaran experimentos, pero que la física debe ser capaz de decir algo sobre

qué ocurrió entonces. Así es. Pero lo que no parece contemplar este argumento es que nuestras teorías del universo primitivo intentan explicar qué ocurrió en el pasado remoto a partir de lo que observamos en el presente. Es decir: siempre se trata, en último término, de explicar observaciones.

El postulado del colapso no puede verse como un elemento extraño a la mecánica cuántica, sino como una regla básica que hace de ella una teoría científica operativa. Es por esta razón por la que la IMM se ve forzada a recuperar la regla de Born, empleando para ello una artificialidad extrema. Todo esto con el resultado final de que, a efectos prácticos, podemos ignorar toda la plétora de mundos paralelos y usar el formalismo ordinario de la mecánica cuántica. La impresión que se obtiene es, por tanto, que los muchos mundos acaban reduciéndose a un mero recurso dialéctico.

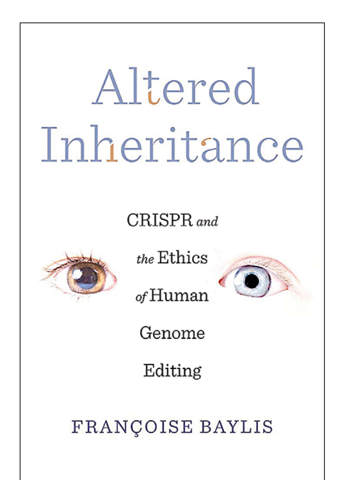
A pesar de todo lo anterior, el autor insiste en la *realidad* de todos los mundos en los que la función de onda se ramifica. La IMM parte de un presupuesto que, aunque Carroll denomine ontológico, podría también calificarse de metafísico: que la función de onda describe la realidad, y no simplemente nuestro conocimiento exhaustivo de ella. Se dota, por tanto, al espacio de todas las funciones de onda de realidad física, y se asume que los observadores son «vectores» de ese espacio. La interpretación de las diferentes ramas de la función de onda como mundos separados está basada, de hecho, en este compromiso metafísico.

La analogía usada por Carroll para ilustrar el significado de esos diferentes mundos es ciertamente reveladora: es, nos dice, como considerar un mundo habitado por los espíritus de los difuntos, en el que estos pueden interaccionar entre sí pero no con nosotros. A la vista de lo anterior, la respuesta que la IMM ofrece a los «problemas interpretativos» de la mecánica cuántica recuerda a la «solución» de problemas clásicos como la teodicea, invocando la existencia de realidades transcendentes.

Además del arsenal de argumentos presentados a favor de la IMM, Carroll se sirve también de un viejo truco dialéctico. Su discusión comienza intentando convencer al lector de la inviabilidad de la interpretación de Copenhague. Después, dando este punto por demostrado, la IMM se contrasta positivamente con alternativas más débiles o incluso marginales, como la mecánica de Bohm y las teorías de colapso espontáneo. Pero, muy a pesar de la argumentación del autor, la cuestión central de si los muchos mundos pueden o deben sustituir a la mecánica cuántica como una teoría científica operativa permanece sin demostrar.

Pese a estas críticas al núcleo argumental del libro, *Something deeply hidden* no es una obra carente de mérito. Carroll hace un gran esfuerzo divulgativo y el resultado es notable. Su discusión de la historia de la mecánica cuántica resulta muy recomendable, y algunos capítulos ofrecen magníficas presentaciones de temas de investigación punteros. Es el caso de las secciones finales del libro, dedicadas a las aplicaciones de la IMM a la teoría cuántica de campos y la gravedad cuántica, que sirven de excusa para discutir aspectos de la física de los agujeros negros y la noción de holografía. En resumen, se trata de una lectura entretenida e informativa, si bien exige al lector mantener su capacidad crítica en permanente alerta.

—Miguel Á. Vázquez-Mozo
Departamento de Física Fundamental
Universidad de Salamanca



ALTERED INHERITANCE
CRISPR AND THE ETHICS OF HUMAN GENOME EDITING
Françoise Baylis
Harvard University Press, 2019
304 págs.

Ética de la edición genómica

Razones a favor y en contra de una moratoria

Estamos inmersos en una revolución de consecuencias imprevisibles para el futuro de nuestra especie. El ser humano tiene ya en sus manos el poder de cambiar su propia constitución y naturaleza mediante la reconfiguración de su genoma, el patrimonio genético que lo individualiza e identifica. Con la invención de las técnicas de manipulación genética se ha abierto el camino hacia una investigación y aplicaciones tan esperanzadoras como temibles. De las múltiples cuestiones éticas que suscitan los nuevos métodos de edición genética nos habla en *Altered inheritance* Françoise Baylis, experta en bioética de la Universidad Dalhousie y asesora de la Organización Mundial de la Salud en cuestiones de edición del genoma humano.

En un par de metros de ADN, plegado con asombrosa economía de espacio, porta la célula humana su manual de instrucciones. Las instrucciones contenidas en el ADN se transcriben en otro lenguaje, el del ARN, como paso intermedio para dirigir el proceso de síntesis de proteínas. A la secuencia de ADN que codifica una proteína la llamamos gen, la unidad de la herencia. Considerados en conjunto, los genes conforman el genoma de un organismo.

Los genomas de los eucariotas constan de miles de millones de bases de ADN. Una mutación o alteración de esas secuencias puede comportar la pérdida de la función o la formación de una proteína anómala y convertirse en trastorno hereditario. Para remediar tales errores recurrimos a la terapia génica, que implica manipular el material genético. A las modificaciones que abarcan las tareas de rastrear, cortar, sustituir o engarzar genes se le ha puesto el nombre de «edición» porque simula la labor del revisor de un escrito. La edición genómica opera cambios en el ADN de nuestras células somáticas o de las germinales. Las primeras son las que componen

los tejidos del cuerpo, mientras que las segundas corresponden a los gametos y sus precursores. Los cambios en las células somáticas no pasan a las generaciones siguientes, pero los inducidos en la línea germinal sí [*véase* «Modificar nuestra herencia», por Stephen S. Hall; Investigación y Ciencia, noviembre de 2016].

En menos de cien años hemos pasado de la idea de manipular la línea germinal humana, propuesta por Herman Joseph Muller en los años veinte de la centuria pasada, al nacimiento de las dos primeras niñas con modificaciones genéticas introducidas mediante la técnica CRISPR. A finales de noviembre de 2018, el científico He Jiankui provocó un auténtico terremoto con el anuncio de que dos gemelas, conocidas por los pseudónimos Lulu y Nana, habían sido sometidas en su fase embrionaria a un proceso de ingeniería genética para inocularles resistencia al virus del sida, portado por su progenitor masculino. El rechazo fue unánime.

La edición genómica dio sus primeros pasos clínicos con sistemas *ex vivo* y, más recientemente, recurriendo a adenovirus asociados. Pero, de todas las técnicas terapéuticas, el sistema CRISPR-Cas9 ha revolucionado los métodos moleculares del tratamiento de las enfermedades [*véase* «La aplicación de CRISPR en humanos», por Marc Güell; Investigación y Ciencia, enero de 2020]. El descubrimiento de la técnica CRISPR-Cas9 como método de edición genómica ha aportado una vía bastante sencilla de modificación del genoma en sitios específicos, merced a su mecanismo único de enlace con el ADN mediado por ARN.

Por tratarse de la modificación de la constitución humana, la ética ha sido siempre un referente para la ingeniería genética. Sobre la forma en que debe intervenir en el quehacer científico, los investigadores discrepan [*véase* «La cumbre sobre edición genética en humanos concluye con opiniones divergentes», por Sara Reardon; Investigación y Ciencia, febrero de 2016]. Baylis es partidaria de un acuerdo lo más amplio posible en torno a las normas que deben regir el comportamiento del científico. Puede caerse, sin embargo, en un asambleísmo donde el número de votos valga más que la solidez del razonamiento. Dos son las principales doctrinas sobre este particular: la utilitarista, que prima las consecuencias que se derivan de la investigación, y la ética objetiva, que propone una serie de principios y normas de obligado cumplimiento basada en la concepción personal y única del ser humano. Los hay incluso radicales, que postulan que la ética no debe entrar en el laboratorio y solo debe importar el criterio del científico. La manipulación genética de las células somáticas no suele crear problemas éticos, pero la cuestión se torna espinosa al abordar los experimentos en la línea germinal. A propósito de este tipo de modificaciones, en congresos y en declaraciones personales se ha abogado por una moratoria; solicitud que otros rechazan, urgidos, dicen, por las necesidades de los pacientes.

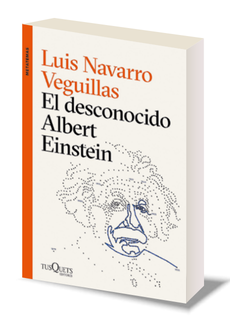
Pese a ello, la investigación experimental no se ha detenido. En 2015, Kathy Niakan, del Instituto Francis Crick de Londres, solicitó el permiso a la Autoridad sobre Fecundación y Embriología Humanas para modificar genéticamente embriones humanos. En diciembre de 2016 se aprobó en el Reino Unido el uso de la donación de mitocondrias para eliminar enfermedades a través del ADN mitocondrial. Y unos meses antes, en septiembre, se había informado de que un niño concebido mediante transferencia genómica nuclear (conocida también como «fecundación in vitro de tres progenitores») había nacido en México en abril. También se dijo por entonces que había nacido por esa técnica otro niño en China, y en 2017 se produjo otro nacimiento similar en la Clínica Nadia de Kiev. Desde entonces se han registrado varios casos más en Ucrania, y en enero de 2019 se anunció un primer embarazo resultante de una colaboración greco-hispana.

En la consideración ética de la investigación sobre la línea germinal, para determinados expertos, Baylis entre ellos, importa más llegar a un acuerdo lo más amplio posible que las razones que puedan esgrimirse. Reduciendo un tanto la división, podría decirse que para algunos importa más la cantidad que la calidad, aunque suelen aceptarse como orientativos determinados criterios: promoción del bienestar, transparencia, cuidados debidos, ciencia responsable, respeto a las personas, juego limpio y cooperación internacional. Al tratarse a menudo de manipulación embrionaria, el debate sobre la naturaleza humana del cigoto y las primeras fases de su desarrollo, incluso hasta el nacimiento, suele enfrentarse al problema de la persona, cuestión que cae más en el terreno de la filosofía y de la ética que en el genuinamente científico.

—Luis Alonso

NOVEDADES

Una selección de los editores de *Investigación y Ciencia*



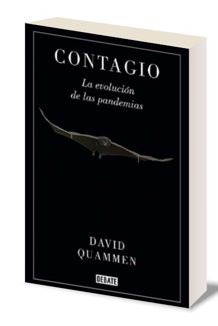
EL DESCONOCIDO ALBERT EINSTEIN

Luis Navarro Veguillas
Tusquets, 2020
ISBN: 978-84-9066-783-5
560 págs. (24 €)



MEMORIAS DE UN CLIMA CAMBIANTE
ENTENDER EL PASADO PARA CORREGIR EL FUTURO. UNA VISIÓN CIENTÍFICA SOBRE LA EMERGENCIA CLIMÁTICA

Javier Martín-Chivelet
Shackleton Books, 2020
ISBN: 978-84-17822-91-0
176 págs. (16,90 €)



CONTAGIO
LA EVOLUCIÓN DE LAS PANDEMIAS

David Quammen
Debate, 2020
ISBN: 9788418006760
624 págs. (23,90 €)

Recopilación de Daniel C. Schlenoff

AGOSTO

1970

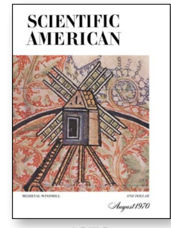
Una «cucharada» de Luna

«En las extensas planicies de la Luna, que llamamos “mares” (como el mar de la Tranquilidad, lugar del alunizaje tripulado del *Apolo 11*), las profundidades de los cráteres que han alcanzado el lecho rocoso revelan un espesor regolítico de entre cinco y diez metros. Así pues, los astronautas Neil A. Armstrong y Edwin E. Aldrin se posaron a varios metros por encima de la roca sólida en la base de la Tranquilidad, y las muestras geológicas que trajeron consigo eran superfluas. Estuvieron moviéndose por encima del regolito, y con pala y pinzas recogieron la muestra lunar de esa capa de residuos rocosos. Nuestro grupo del Observatorio Astrofísico del Instituto Smithsoniano ha estado trabajando con 16 gramos (una cucharada sopera más o menos) de aquel suelo. —John A. Wood»

Inmunidad y anticuerpos

«*Inmunidad* es un término de uso común, habitualmente aplicado al complejo sistema de respuestas con que el cuerpo se defiende ante los microorganismos invasores o tejidos extraños. Pero el vocablo abarca mucho más que sus aspectos clínicos. Lo que ya sabemos acerca del sistema inmunitario y sus moléculas clave, los anticuerpos, evidencia que la inmunología guarda una relación directa con algunos de los problemas más básicos: la naturaleza de los mecanismos por los que las moléculas se reconocen entre sí, el modo en que se expresan los genes en los organismos superiores y el origen de diversos estados patológicos, incluido el cáncer. Sea como sea, la solución a tan profundos problemas requerirá conocer la estructura de las moléculas de anticuerpos. —Gerald M. Edelman»

En 1972, Edelman fue galardonado con el premio Nobel de fisiología o medicina por sus descubrimientos sobre la estructura química de los anticuerpos.



1970



1920



1870

1920

Frutos del mango

«El Departamento de Agricultura de EE.UU. ha conseguido, gracias a sus exploradores agrícolas y al intercambio con los departamentos de agricultura de las Indias Orientales Británicas, una de las mayores colecciones de variedades de mango del mundo, y ahora tiene frutando, en su centro de aclimatación de plantas de Miami, unas veinte variedades seleccionadas. Estas contradicen los numerosos calificativos negativos que ha recibido el mango. Algunos de sus frutos contienen menos fibra que un melocotón de hueso suelto, y pueden cortarse a lo largo para abrirlos y comerlos con una cuchara como melones chinos.»

Las escuelas y el Ejército

«El Consejo Nacional de Investigaciones de EE.UU. anuncia que los tests mentales que se usaron con éxito en el Ejército durante la guerra van a emplearse en las escuelas públicas del país. Se ha elaborado un programa de tests grupales que posibilitará realizar evaluaciones completas en las escuelas cada año, e incluso cada semestre, de modo que la clasificación por cursos y el tratamiento educativo personal puedan ajustarse con la frecuencia deseable.»



1970: La huella de uno de los astronautas del *Apolo 11* revela la consistencia de la superficie lunar, pero también sirve de metáfora de la exploración humana de la galaxia.

NASA

Sistema métrico decimal

El creciente y vivo interés en el importante debate sobre la necesidad de adoptar el sistema métrico decimal en los EE.UU. se ha reflejado recientemente en la sección de correspondencias de *Scientific American*. Durante muchos años, esta revista ha creído que la adopción del sistema, lógico en su desarrollo e internacional en su aplicación, resultaría tan útil en la industria, el comercio y las transacciones ordinarias cotidianas de los EE.UU. como lo ha sido en la Europa continental, y también en el trabajo puramente científico, donde su uso es hoy universal.

1870

De ballenas y setas venenosas

«Es un hecho real y sencillo, y cotidianamente observable, que todas las formas de trabajo animal resultan de la recepción y asimilación de unas decenas de litros de oxígeno, unas decenas de gramos de agua, de fécula, de grasas y de carne. Desde un punto de vista químico, el ser humano podría definirse como algo similar. Una gran autoridad como el profesor Thomas Huxley ha estado tratando, recientemente, de lo que él llama “protoplasma, o principio físico de la vida”. Pretende dar con los factores comunes al liquen musgoso de la piedra y a los pintores o botánicos que los estudian. El profesor Huxley no ha demostrado, y es imposible que lo haga, que tales protoplasmas acaso no posean diferencias esenciales. Los fisiólogos aún no pueden explicarnos cómo, de cuatro células absolutamente idénticas en estructura orgánica y composición, una se transforme en Sócrates, otra en seta venenosa, otra en escarabajo y otra en ballena.»

NEUROBIOLOGÍA

El encéfalo aprende por vías imprevistas

R. Douglas Fields

Los neurocientíficos han descubierto un conjunto de mecanismos celulares desconocidos que generan los recuerdos recientes.



FÍSICA

Las partículas más oscuras

William Charles Louis y Richard G. Van de Water

Un experimento aspira a encontrar un nuevo tipo de neutrino que podría proporcionar la clave para entender el sector oscuro del universo.

MATEMÁTICAS

La teoría de categorías

Manon Bischoff

En los últimos 70 años ha surgido un área de las matemáticas que permite descubrir conexiones inesperadas. Esta abstracta disciplina ha encontrado aplicaciones en la física, la informática y la lingüística.

ARQUEOLOGÍA

La conquista agrícola de Europa

Laura Spinney

El encuentro de los pueblos agrarios con los cazadores-recolectores habría dado lugar a una jerarquía que hoy resulta inquietante.



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES
Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz
DIRECTOR DE MÁRQUETIN Y VENTAS
Antoni Jiménez Arnay
DESARROLLO DIGITAL
Marta Pulido Salgado
PRODUCCIÓN
M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA
Eva Rodríguez Veiga
ADMINISTRACIÓN
Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES
Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF Laura Helmuth
PRESIDENT Dean Sanderson
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek

DISTRIBUCIÓN

para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca - Trigo, 39 - Edificio B
28914 Leganés (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD

Prensa Científica, S. A.
Teléfono 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

ATENCIÓN AL CLIENTE

Teléfono 935 952 368
contacto@investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Fabio Teixidó: *Apuntes* y *Una nueva visión de la Vía Láctea*; Andrés Martínez: *Apuntes* y *El inesperado origen de los dedos*; José Óscar Hernández Sendín: *Apuntes*, *Inteligencia artificial para descubrir fármacos* y *El precio de contaminar*; Anna Ferrán: *Los miniórganos revelan de qué modo el coronavirus hace estragos en el cuerpo*; Ernesto Lozano: *¿Por qué hay materia en el universo?* y *Sucesiones sin regularidades*; Ignacio Navascués: *Retina luminosa*; Xavier Roqué: *Mirar a los elefantes e ignorar los carteles*; Lorenzo Gallego: *Experiencias de la muerte inminente*; Marián Beltrán: *Vivir con la selva*; Javier Grande: *El sonido de una gota de agua*; J. Vilardell: *Hace...*

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotimpres - Pla de l'Estany s/n - Pol. Ind. Casa Nova 17181 Aiguaviva (Girona)

Printed in Spain - Impreso en España